

VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNGEN AN FEINWURZELN
UND MYKORRHIZA IN GESCHÄDIGTEN BUCHENBESTÄNDEN
(FAGUS SYLVATICA L.)

Jean-Marc Vincent,

Disbui. München
1988



Digitized by the Internet Archive
in 2026

VERGLEICHENDE UNTERSUCHUNGEN AN FEINWURZELN
UND MYKORRHIZA IN GESCHÄDIGTEN BUCHENBESTÄNDEN
(FAGUS SYLVATICA L.)

Dissertation zur Erlangung
des Doktorgrades der
Forstwissenschaftlichen Fakultät
der Ludwig-Maximilian-Universität,
München

Vorgelegt von Jean-Marc Vincent,
geb. in F - Ste Colombe

München, Dez. 1987

1. Referent: Prof. Dr.
P. Schütt
2. Referent: Prof. Dr.
K. Kreutzer

Tag der mündl. Prüfung:
16.02.88

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Literaturübersicht	1
1.1 Verfallserscheinungen am Feinwurzelsystem und an der Bodenvegetation in geschädigten Wäldern	1
1.2 Problemstellung	5
2. Beschreibung der Probeflächen	7
2.1 Neureichenau	9
2.2 Thiergarten	12
2.3 Schierling	12
2.4 Wolfratshausen	13
2.5 Erlangen	13
3. Material und Methoden	16
3.1 Auswahl der Probebäume	16
3.2 Wurzeluntersuchungen an Altbäumen	18
3.2.1 Probenahme	19
3.2.2 Wurzelgewinnung	20
3.2.3 Auswertung	21
3.2.3.1 Bestimmung von Biomasse und Nekromasse der Schwach- und Feinwurzeln	22
3.2.3.2 Bestimmung der Kurzwurzelmerkmale	23
3.2.3.3 Statistische Absicherung der Ergebnisse	25
3.3 Wurzeluntersuchungen an Jungpflanzen	28
3.4 Substratversuche	30
3.5 Chemische Analysen	33
3.5.1 Bodenanalysen	34
3.5.2 Wurzelanalysen	35
3.6 Wurzelpathologische Untersuchungen	36
4. Ergebnisse	38
4.1 Wurzelmerkmale von gesunden und geschädigten Altbäumen	38
4.1.1 Wurzelbiomasse und -nekromasse	39
4.1.1.1 Einfluß der Erkrankung auf die Wurzelmasse	46
4.1.1.2 Verhältnis der Feinwurzeldurchmesserklassen	46
4.1.1.3 Schwachwurzelmasse	48
4.1.2 Kurzwurzelmerkmale	50
4.1.2.1 Mykorrhizierungsgrad	51
4.1.2.2 Anteil lebender Mykorrhizen und Mykorrhizengewicht	52
4.1.2.3 Relative und absolute Mykorrhizenzahl	56
4.1.2.4 Relative und absolute Kurzwurzelzahl	59
4.1.3 Feinwurzelmerkmale im Bv-Horizont der Fläche NR 3a	61
4.1.4 Wurzelmerkmale auf der schadensfreien Fläche NR 4	63
4.1.5 Untersuchung der Feinwurzelregeneration mittels der "ingrowth cores" - Methode	66
4.2 Wurzelmerkmale von gesunden und geschädigten Jungpflanzen	70
4.3 Substratversuche	72

4.3.1 Jägerkopf	73
4.3.2 Glashüttenhäng	81
4.4 Chemische Bodenanalysen	83
4.4.1 Neureichenau	85
4.4.2 Wolfratshausen	87
4.4.3 Schierling	88
4.5 Chemische Wurzelanalysen	89
4.6 Wurzelpathologische Untersuchungen	94
5. Diskussion	97
6. Zusammenfassung	108
7. Literaturverzeichnis	110

1. EINLEITUNG UND LITERATURÜBERSICHT

Die seit 1982 beobachteten Krankheitssymptome an der Buche werden wegen ihres plötzlichen Auftretens und ihrer raschen und kontinuierlichen Ausbreitung über die Standortgrenzen hinweg dem Sammelbegriff "Waldsterben" zugeordnet. Diese Bezeichnung schließt ein, daß diese, durch z.T. neue Schadbilder gekennzeichnete Krankheit, betroffene Bäume oder Bestände keineswegs durch wohldefinierte Schadfaktoren zum Absterben bringt. (SCHÜTT et al., 1983).

Im Jahr 1983 - zu Beginn unserer Untersuchung - wurden bereits 26 % der Buchenwaldfläche in der BRD als "geschädigt" (Schadklassen 1 bis 4) eingestuft (BUNDESMINISTERIUM für ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN, 1983). Dieser Anteil hatte sich bis 1987 auf 60 % erhöht. In Bayern waren im gleichen Jahr nur 20 % der Buchenfläche "ohne Schadmerkmale" (BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM für ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT und FORSTEN, 1987).

1.1 VERFALLSERSCHEINUNGEN AM FEINWURZELSYSTEM UND AN DER BODENVEGETATION IN GESCHÄDIGTEN WÄLDERN

Die ersten Symptome der Erkrankung wurden im Kronenraum der Tanne sichtbar. Von parallel auftretenden Schäden im Feinwurzelystem wurde schon früh berichtet (BLASCHKE, 1980, 1981). Später wurde diese Beobachtung, insbesondere für die eingehend untersuchte Baumart Fichte, stets bestätigt. So beschreiben LISS et al. (1984) Absterbeerscheinungen an Fichtenfeinwurzeln und schließen gleichzeitig auf eine gestörte Reproduktionsfähigkeit des Feinwurzelystems. BÖRESSON und PERSSON (1986) berichten für geschädigte Exemplare dieser Baumart von einem Rückgang der Feinwurzelbio- und -nekromasse, begleitet

von einer Verlagerung des Wurzelwachstums in die Humushorizonte. EICHHORN (1987) stellte ebenfalls einen Verfall der Feinwurzeln, vor allem in den Mineralhorizonten, fest, der jedoch gleichermaßen "geschädigte" wie "gesunde" Bäume betraf.

Erste Untersuchungen ergaben, daß das Wurzelsystem der Buche ebenfalls von der Erkrankung betroffen war. FLÜCKIGER et al. (1984) berichten von der reduzierten Verzweigung und Regeneration sowie von einer erhöhten Mortalität der Feinwurzeln geschädigter Buchen in der Nordwestschweiz. Das Wurzelwachstum von Altbuchen in Abhängigkeit vom Substrat untersuchten REHFUESS et al. (1983). Sie stellten im Tiefwurzelsystem eine höhere Anzahl lebender Wurzeln auf basenreichen Böden als auf podsoligen Braunerden fest.

Im Bereich des Feinwurzelsystems der Waldbäume kommt der Mykorrhiza, insbesondere im Hinblick auf die Ernährung und den Schutz gegen pathogene Mikroorganismen, besondere Bedeutung zu (BJÖRKMANN, 1956; CERNY, 1974; HARLEY und SMITH, 1983). Im Rahmen der seit Jahren auftretenden Waldschäden wurde auch der Mykorrhiza Aufmerksamkeit geschenkt.

Die Ektomykorrhiza in geschädigten Tannenbeständen wird vor allem im Tiefwurzelsystem zunehmend von Kurzwurzeln abgelöst, die von parasitische Pilzen befallen sind (BLASCHKE, 1981). Als krank eingestufte Fichten auf 4 bayerischen Standorten besaßen stets höhere Anteile inaktiver Mykorrhizen als gesunde (LIVINGSTON und BLASCHKE, 1984). KUMPFERER und HEYSER (1986) untersuchten Änderungen des Mykorrhiza-Spektrums im Stammabflußbereich von Altbuchen und wiesen auf den Zusammenhang mit sauren Niederschlägen hin.

Schäden an der Mykorrhiza wurden mit einem Rückgang der Pilz-, insbesondere Basidiomyceten-Flora, in mitteleuropäischen Wäldern in Zusammenhang gebracht (SCHMITT,

1984; SCHLECHTE, 1984). TYLER (1985) stellte hingegen eine Zunahme der Anzahl mykorrhizabildender Pilzarten mit steigender Azidität des Bodens in Buchenwäldern Schwedens fest.

Gleichzeitig mit Schädigungen am Baumbestand wurde vielfach ein Rückgang der Bodenflora in geschädigten Wäldern beobachtet und in Zusammenhang mit der Versauerung des Bodens gebracht (WITTIG, 1986).

Bei der Buche wurde vor allem dem vom Stammablaufwasser besonders beeinflussten Stammfußbereich Aufmerksamkeit gewidmet. Oft wurde eine in diesem Bereich veränderte Bodenflora beobachtet (KOENIES, 1985; NEITE und WITTIG, 1985; JOCHHEIM, 1985). Auf Veränderungen im Schwermetallgehalt und im pH-Wert wird hingewiesen (KAZDA und GLATZEL, 1984). Schwierigkeiten bei der Naturverjüngung der Buche beschreibt GEHRMANN (1984), der über das Einstellen des Längenwachstums der Wurzeln von Buchenjüngpflanzen im Mineralhorizont versauerter Böden berichtet.

Die Frage, ob Änderungen der Wirkung von "leachates" auf die Bodenflora mit der Erkrankung der Waldbäume in Zusammenhang stehen, wurde von PAUL und SCHÜTT (1987) experimentell untersucht. Sie fanden heraus, daß Buchenblattextrakte von geschädigten Altbuchen das Wurzelwachstum von Bodenpflanzen stärker hemmten als die Extrakte gesunder Bäume. Auf die Auswaschung im Verlauf der Erkrankung gebildeter phytotoxischer Komponenten wird geschlossen.

Wurzelschäden scheinen mit dem Waldsterben bei Buche verbunden zu sein. Ob sie letztlich durch direkten Eintrag von Schadstoffen in den Boden oder indirekt über die Schädigung des Blattapparates (GLAVAC, 1987; PRINZ et al., 1982; SCHÜTT und COWLING, 1985) zustandekommen, ist noch unglklärt. In der Ursachendiskussion über "neuartige Waldschäden" wird jedoch meist von einer maßgeblichen Beteiligung von Luftschadstoffen ausgegangen (SCHÖPFER

und HRADETZKY, 1984). In diesem Zusammenhang wurden unterschiedliche Wege aufgezeigt, die zur Schädigung des Wurzelsystems führen können.

Eine Reihe von Arbeiten setzt sich mit der direkten Beeinflussung des Wurzelsystems durch chemische Bodenveränderungen auseinander. Die negativen Folgen von Säure- und Schwermetalldeposition auf das Wurzelwachstum beschreibt THORMANN (1986). Die phytotoxische Wirkung von freigesetzten Aluminium wurde hervorgehoben (ULRICH, 1981, 1986a/b); ROST-SIEBERT, 1983; MURACH, 1984; HÜTTERMANN, 1985). Die dadurch hervorgerufene direkte Schädigung der Wurzeln wird als Grund für die Erkrankung der Waldbäume vermutet.

In einem Geländeexperiment wird der Einfluß von saurem Regen auf die Wachstumsvorgänge in einem Waldökosystem untersucht (KREUTZER und BITTERSOHL, 1986). Nach saurer Beregnung während 2 Vegetationsperioden waren bereits negative Änderungen im Feinwurzelsystem von Altfichten festzustellen: Im Vergleich zu unbehandelten Flächen war der Anteil nekrotischer Feinwurzeln gestiegen (BLASCHKE, 1986). Ein gleichgerichteter Trend der gesamten mikrobiellen Aktivität sowie, in geringerem Umfang, der Bodenflora, war auch zu beobachten (KREUTZER und ZELLES, 1986; RODENKIRCHEN, 1986).

Auch Schädigungen des Assimilationsapparats durch Luftschadstoffe, insbesondere durch Schwefeldioxyd und Ozon, können sich nachteilig auf den Mykorrhizastatus von Waldbäumen auswirken (REICH et al., 1984; MAHONEY et al., 1985). Das Zusammenwirken von Immissionen und abiotischen Stressfaktoren, besonders Trockenheit und Frost, und ihre Rolle bei den Waldschäden, wurde ebenfalls untersucht (ECKSTEIN et al., 1984; BOSCH et al., 1985). Wurzelschädigungen und dadurch verursachte erhöhte Frostempfindlichkeit konnten in Experimenten mit gleich-

zeitiger Begasung der Krone und Frosteinwirkung nachgewiesen werden (RANFT et al., 1979).

1.2 PROBLEMSTELLUNG

Wichtige Erkenntnisse über die Wirkungsweise von Schadfaktoren konnten durch die genaue Beschreibung von Degradationserscheinungen an Wurzeln gewonnen werden (LISS et al., 1984; BLASIUS et al., 1985; ULRICH, 1986a; AGERER et al., 1986; MEYER, 1987). Eine genaue vergleichende Beschreibung des Feinwurzelsystems von geschädigten Altbuchen und der Folgen der Erkrankung auf den Mykorrhizabesatz wurde bislang nicht durchgeführt.

Ziel dieser Arbeit war, durch die quantitative Erfassung der relevanten Kenngrößen der Feinwurzeln von äußerlich als "gesund" oder "geschädigt" eingeschätzten Buchen die Frage zu beantworten, inwiefern Schädigungen des Assimilations-Apparats mit einem Verfall der Feinwurzeln, besonders der Mykorrhiza, verbunden waren.

Der Weg des direkten Vergleichs (Paarvergleich) bot sich an, da absolute Bezugswerte, mit denen einzeln gewonnene Daten verglichen werden könnten, weitgehend fehlten.

Die derzeit beobachteten Waldschäden lassen sich durch ihre oberirdischen Schäden nicht zu bestimmten Standorts-, insbesondere Bodentypen, zuordnen. Im Hinblick auf die Frage, ob edaphische Faktoren sich differenzierend auf das Schadbild im Wurzelbereich auswirken, wurden die Aufnahmen auf 7 Probeflächen aus 4 verschiedenen Wachstumsgebieten durchgeführt. Die Elementgehalte in den Feinwurzeln von Altbäumen und im Boden sollten erste Hinweise über Korrelationen zwischen der Schadstufe der Bäume und den ernährungsphysiologischen Kenngrößen liefern.

An 2 Standorten wurde der Einfluß des Bodens unter geschädigten und gesunden Altbuchen auf die Entwicklung von Buchenkeimlingen in Versuchen getestet. Ergänzend

dazu fanden Aufnahmen des Wurzelsystems von Jungbuchen aus geschädigten Probeflächen statt. Schließlich wurde in Isolationsversuchen der Frage nachgegangen, ob wurzel-pathogene Pilze in ursächlichem Zusammenhang mit Fein-wurzelschäden stehen.

2. BESCHREIBUNG DER PROBEFLÄCHEN

Die Untersuchungen wurden in 9 Beständen aus 5 bayerischen Wuchsbezirken durchgeführt, in denen, außer auf einer schadensfreien Vergleichsfläche, oberirdische Schadsymptome an der Buche in verstärktem Maß auftraten. Diese Bestände wurden so ausgewählt, daß sie verschiedene Standorttypen erfaßten.

Die aufgeführten Daten stammen zum Teil aus forstamtseigenen Unterlagen. Dies betrifft einige allgemeine Standortmerkmale wie auch die meisten Bestandsdaten.

Die Angaben über die natürliche Waldzusammensetzung wurden aus SEIBERT (1968) entnommen.

Die meteorologischen Daten wurden meist aus den Standortoperaten übernommen. Wo keine bestandesspezifischen Werte zur Verfügung standen, wurden diese annäherungsweise aus dem "Klima-Atlas von Bayern" (KNOCH, 1952), Meßperiode 1881-1930, übernommen. Diese Werte entsprechen mit nur geringfügigen Abweichungen denen aus nur teilweise veröffentlichten Meßreihen neueren Datums (A.K. STANDORTSKARTIERUNG, 1978).

Die Bodenmerkmale wurden für jeden untersuchten Standort gesondert aufgenommen (s. Kap. 3.1. u. 3.2.). Die angegebenen Horizontttiefen stellen ein Mittel aus wiederholten Probenahmen dar. In den Tabellen 1 und 2 wird für jede Probefläche entsprechend der Darstellung der Ergebnisse zwischen "Humus-" ($H=O+H$) und "Mineralboden" ($M=Bv, Ae$ bzw. Al) getrennt. Erfast wurden in dieser Arbeit die oberen 20 cm des Bodenprofils. Die Humusaufgabe (O) wurde in die laufende Tiefenangabe einbezogen. Die in Klammern angeführten Horizonte gingen in die Untersuchung nicht ein.

Zur besseren Übersicht werden in den Tabellen 1 und 2 die im Kapitel 4.4 ausführlich dargestellten pH-Werte und

Ca/Al-Verhältnisse in Form des Mittelwerts aller Messungen übernommen.

Die durchschnittliche Schadklasse der Bestände bezieht alle Stufen von 0 ("ohne Schadensmerkmal") bis 4 ("abgestorben") ein (vgl. 3.1.). Die Werte für die Probeflächen in Neureichenau wurden im Jahr 1983 von SUMMERER (1986) ermittelt. Die Untersuchungen in Wolfratshausen (W) fanden in einem Schulungsbestand zur Waldschadensansprache der Bayerischen Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt statt. Die ermittelten Schadklassen wurden in dieser Arbeit übernommen (KENNEL, 1984, Pers. Mitteilung). Die für "Thiergarten" (T) und "Schierling" (S) angeführten Schadklassen sind dagegen großräumig, auf Forstamt-Ebene für die Baumart Buche errechnete Werte, in die alle Altersklassen eingingen (FORSTVERWALTUNG THURN UND TAXIS, 1984, Pers. Mitteilung).

Zur Abschätzung der Immissionssituation auf den einzelnen Probeflächen wurden die Ergebnisse aus der Bioindikator-Untersuchung (Bay. Landesamt f. Umweltschutz, 1985) für das Jahr 1985 herangezogen. Sie weisen folgende Größen auf (Schwefelgehalt von Fichtennadeln):

- NR: unter 1 mg/g Tr.S.
- T, S und W: 1 bis 1,25 mg/g Tr.S.

Diese Werte liegen im Bereich des Landesmittelwerts und deuten für T, S und W auf eine mittlere Belastung hin.

Für die Flächen in Neureichenau (NR) konnten zusätzlich die Luftschadstoffmessungen aus der nahegelegenen und in ihrer geographischen Lage vergleichbaren Meßstation Haidmühle/Dreisessel herangezogen werden. Es wurden an diesem Standort im Vergleich zu anderen ländlichen Gebieten relativ niedrige mittlere Konzentrationen sowie Spitzenwerte an SO_2 (0,017 mg/m³ im Jahresmittel), NO_x (0,002 ppm im Mittel des Winterhalbjahrs) und O_3 (0,002 ppm im Mittel des Winterhalbjahrs) registriert. Diese Werte be-

stätigen die ebenfalls anhand der Bioindikator-Untersuchungen festgestellte schwächere Belastung dieses Gebiets.

2.1 NEUREICHENAU (NR)

Im Forstamt Neureichenau wurden in folgenden 4 Beständen Feinwurzeluntersuchungen an Altbäumen, sowie Substratversuche (NR 2 und 3) durchgeführt:

- NR 1: Lichtenberg (Distrikt XVII 2 c1).
- NR 2: Glashüttenhäng (Distrikt III 5 a1).
- NR 3: Jägerkopf (Distrikt XIV 2 a1).
In diesem Bestand wurden 2 Probeflächen ausgewiesen (NR 3a und NR 3b).
- NR 4: Eisnerhäng (Distrikt III 4 b1).

Bei den Flächen NR 1,2 und 3 handelt es sich um geschädigte Bestände mit ähnlichen Standorts- und Bestandesmerkmalen. Die folgende Beschreibung bezieht sich auf diese Bestände. Anschließend werden die davon abweichenden Merkmale der schadensfreien Vergleichsfläche NR 4 erläutert. Die wichtigsten Standorts- und Bestandesdaten sind aus Tabelle 1 zu entnehmen.

Die Bestände befinden sich in einem ausgedehnten Bergmischwaldgebiet (Fi./Ta./Bu.), gelegen in einer Höhe von ca. 850 bis 1300 m ü. NN im südlichen Teil des Wuchsbezirks "Innerer Bayerischer Wald".

Das Klima wird als montan-humid bezeichnet.

Die Klima-Merkmale lauten wie folgt:

- Jährliche Niederschlagssumme: 1200 mm.
- N-Summe i. d. Vegetationsperiode: 380 mm.
- Jahresmitteltemperatur: 5,1 °C
- Mitteltemperatur i. d. Vegetationsperiode: 12,5 °C.

	NR 1	NR 2	NR 3a	NR 3b	NR 4	
- Standort						
. Lage						
Höhe (= ü. NN)	950	920	990	980	1070	
Neigung	n. Osten schwach geneigt	n. N-Osten mäßig geneigt	n. Osten geneigt	n. Osten schwach geneigt	n. S-W stark geneigt	
. Klima	s. Text					
. Boden						
Bodenausgangs- material	Gneißver- witterungs- lehm	Granitver- witterungs- lehm	Gneißverwitterungs- lehm		Granitver- witterungs- lehm	
Bodenart (Kiesanteil)	suL (9%)	sL (21%)	suL (12%)	suL (10%)	sL (25%) m. Block- Überlag.	
Humusform	Typischer Moder	Typischer Moder	Typischer Moder	Typischer Moder	Rohhumus- artiger Moder	
Bodentyp	Saure Braunerde	Schwach podsolierte Braunerde		Gley- Braunerde	Podsol	
Horizonte (Tiefe in cm)	H M M	O (0-7) Ah (7-11) Bv	O (0-8) Ahe (8-12) Bv	O (0-3) Ahe (3-12) Bv	O (0-5) Ahe (5-11) Bv	O (0-8) Ahe (8-11) Ae (Bhs)
pH (Ca Cl ₂)	H M M	3,4 4,0	3,0 3,6	3,1 3,9	3,3 3,9	2,8 3,1
Ca/Al-Verhältnis	H M H+M	- - -	- - -	- - 0,09	0,10 0,03 -	- - 0,52
Wasserhaushalt	frisch	frisch	sehr hangwasserfrisch		frisch	
- Bestand						
Baumarten	F1, Bu, Ta	F1, Bu	Bu (Ta, F1)		Bu (F1)	
Bonität (Bu)	2,0	2,0	2,5		2,0	
Alter (Bu/1983)	81	97	96		63	
Bestandesschluss	lückig	lückig	lückig		geschl.	
Durchschn.- Schadkl. des Bestandes/1983 (aus x Buchen)	0,8 (39)	1,3 (24)	1,1 (35)		Schadens- frei	

Tab. 1: Standorts- und Bestandesmerkmale der Probeflächen Neureichenau (NR)

Verstärkt durch die luftfeuchten (170 Nebeltage/Jahr) und schattigen Hanglagen gewährleistet dieses Klima in der Vegetationsperiode eine stets ausreichende Wasserversorgung. Der Jahresgang der Niederschläge ist durch ein ausgeprägtes 2-gipfeliges Maximum (So./Wi.) gekennzeichnet. Die vorherrschenden Windrichtungen sind S/SW sowie NO.

Die meist gut durchlüfteten (leichte Verdichtungstendenz in NR 3b), zur Durchwurzelung günstigen, tiefgründigen Substrate werden als frisch bezeichnet.

Alle Böden liegen im stark sauren Bereich (pH 3-5), mit niedrigen Ca/Al-Verhältnissen, z.T weit unter 1.

Die mäßig wüchsigen, einschichtig aufgebauten Bestände NR 1, 2 und 3(a und b) (Altersklasse V) stocken auf (N-)OHängen in einer Höhe um 950 m ü. NN. Sie weisen wegen der Entnahme der zahlreichen in den letzten Jahren abgestorbenen Bäume einen reduzierten Deckungsgrad (um 0,8) und eine Durchschnitt-Schadklasse um 1 (zwischen 0,8 und 1,3) auf.

Die von sichtbaren Schäden freie Versuchsfläche NR 4 befindet sich in einem höher gelegenen (1070 m ü. NN), im allgemeinen wenig geschädigten Walddistrikt. Der jüngere, aufgrund des guten sanitären Zustands durchwegs geschlossene Bestand (AK IV) stockt auf einem relativ exponierten SW-Hang. Die edaphischen Eigenschaften weichen ebenfalls von denen auf den übrigen geschädigten Probestflächen ab. Als Bodentyp liegt ein Podsol mit entsprechend verzögertem Humusabbau (rohhumusartiger Moder) vor. Der pH liegt in den Eluvial-Horizonten im extrem sauren Bereich nahe pH 3. Bemerkenswert war jedoch, daß das Ca/Al-Verhältnis mit 0,52 deutlich höher lag als auf den übrigen Probestflächen dieses Gebietes.

2.2 THIERGARTEN (T)

Detaillierte Daten zum Standort und Bestand sind aus Tab.2 zu entnehmen.

Die Probefläche Thiergarten (FoA Thiergarten, Abteilung I 36) befindet sich 15 km östlich von Regensburg in einem submontanen Bu/Fi/Ta-Waldgebiet im Wuchsbezirk des "Westlichen Vorderen Bayerischen Waldes".

Die Hauptwindrichtung ist Westen.

Gesamtwasserhaushalt: mäßig frisch, aufgrund der Durchlässigkeit des Bodenmaterials und des mäßigen Wasserangebots in der Vegetationsperiode zur Austrocknung neigend.

Der gutwüchsige Buchenbestand der Altersklasse VI/VII stockt auf einer tiegründigen, stark sauren, podsoligen Braunerde (Tab. 2). Aufgrund dieser Eigenschaften läßt dieses Substrat ein geringes Nährstoffangebot erwarten.

Meist schwache, im ganzen Forstamt auftretende Waldsterben-Schäden an Buche (Inventur 1984: Sch.Kl. 1: 59 %, Sch.Kl. 2: 7 %, kaum "starke Schäden" - Sch.Kl. 3 - sowie abgestorbene Bäume).

2.3 SCHIERLING (S)

Die Probefläche Schierling (FoA Schierling, Abt. VII 20a) befindet sich in einem Ei/Bu-Laubwaldgebiet im Wuchsbezirk "Westliches Niederbayerisches Tertiäres Hügelland".

Die Hauptwindrichtung ist Westen.

Gesamtwasserhaushalt: mäßig frisch (Tab.2).

Gutwüchsiger, geschlossener Reinbestand der AK VI/VII.

Insgesamt geringere Waldsterben-Schäden an Buchen im gesamten Forstamt, hauptsächlich an exponierten (Rand-) bäumen.

2.4 WOLFRATSHAUSEN (W)

Die Probefläche Wolfratshausen (FoA Wolfratshausen, Abt. XIII 15 a^o) befindet sich in einem Bu/Fi/Ki- Mischbestand der Bu/Ta-Waldzone im Wuchsbezirk "Westliche kalkalpine Jungmoräne".

Ca. 2 Km westlich der BAB München-Garmisch.

Hauptwindrichtung SW.

Die Muldenlage sowie die hohe Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode (Tab. 2) gewährleisten eine ausreichende Wasserversorgung.

Pseudogley-Parabraunerde mit gutem Nährstoffangebot. Zu bemerken sind die nachträglich festgestellten, voneinander stark abweichenden pH-Werte der Substrate: Das Substrat des gesunden Probebaumes lag im sauren Bereich (4,1/4,7), während für den geschädigten Baum nur schwach saure pH-Werte (6,1/6,4) gemessen wurden.

Gutwüchsiger, geschlossener Bestand der AK VI.

Mittlere bis starke Schäden an Buchen im ganzen Forstamt, besonders im untersuchten Bestand, nicht nur auf exponierte Bäume begrenzt.

2.5 ERLANGEN (E)

Im ganzen Forstamt traten besonders starke Schäden an der Naturverjüngung auf. In diesem Bestand wurden daher Aufnahmen an Jungpflanzen durchgeführt.

Diese Probefläche befindet sich im Forstamt Erlangen, FoDSt. Neunhof, Waldort Thiegelthonlöcher. Wuchsbezirk

	T	S	W
- Standort			
. Lage			
Höhe (m ü. NN)	490	450	620
Neigung	n. Süden schwach geneigt	eben	n. SW mäßig geneigt
. Klima			
Jährliche N-Summe (mm)	760	700	1100
N-Summe i. d. Veg.- Periode (mm)	410	390	680
Jahres-Temperatur (°C)	7,2	7,4	7,5
Temperatur i. d. Veg.-Periode (°C)	14,6	14,8	14,5
Hauptwindrichtung	W	W	SW
. Boden			
Bodenausgangs- material	Granitver- witterungs- lehm	Obere SOM- wassermor- lasse m. Lössberd.	Würm- Jung- Moräne
Bodenart (Kies- anteil in %)	sL (10)	utL (1)	utL (5)
Humusform	Moder	Moder	Moder
Bodentyp	podsol. Braunerde	Parabraun- erde	Pseudogley- P-Braunerde
Horizonte	H	O (0-6)	O (0-5)
(Tiefe in cm)	M	Ahe (6-12)	Ah (5-9)
		Ae	Al
		(Bv)	(Sbt)
H (Ca Cl ₂)	H	3,9	4,5
	M	3,7	3,8
Ca/Al-Verhältnis	H	-	-
	M	-	-
Wasserhaushalt	mäßig frisch	mäßig frisch	(wechsel-) feucht
- Bestand			
Baumarten	Bu	Bu	Bu, F1, K1
Bonität (Bu)	1,0	1,3	-
Alter (Bu/1983)	ca. 120	ca. 120	105
Bestandesschluss	lückig	geschlossen	geschlossen
Schadklasse des Bestandes/FoA für BA Buche (Jahr)	0,7 (1984)	0,5 (1984)	1,8 (1985)

Tab. 2 : Standorts- und Bestandesmerkmale der Probeflächen Thiergarten (T), Schierling (S) und Wolftratshausen (W)

ist Fränkischer Keuper und Albvorland (südliche Keuperabdachung).

Klimadaten:

- Jährliche Niederschlagssumme: 650 mm
- Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode (Mai/August): 280 mm
- Jahrestemperatur: 9 °C

Als Bodentyp liegt eine mäßig trockene, podsolige Braunerde aus lehmigem Flußsand vor. Humusform ist Moder.

Die Probefläche ist Teil eines lichten, sich in Verjüngung befindlichen Buchen-Altbestandes mit Kiefernbeimischung.

Mäßige Schäden an Altbuchen im Untersuchungsjahr (1984).

3. MATERIAL UND METHODEN

3.1 AUSWAHL DER PROBEBÄUME

Auf allen geschädigten Probeflächen wurden jeweils zwei Vergleichsbaumgruppen ("gesund" und "geschädigt") zur Untersuchung des Feinwurzelsystems ausgewiesen.

Auf der äußerlich schadensfreien Fläche NR4 wurde eine Probegruppe aus 4 gesunden Bäumen ausgesucht.

Zwecks Erfassung der Kenngrößen des Feinwurzelsystems in tieferen Bodenschichten wurden schließlich in NR 3a vergleichende Feinwurzeluntersuchungen an gefälltten Bäumen durchgeführt.

In Tabelle 3 sind die wichtigsten Merkmale der Probebäume zusammengefaßt.

Die Ansprache des Gesundheitszustandes geschah anhand morphologischer Kronenmerkmale. Als Schadsymptome galten die von SCHÜTT et al. (1985) sowie ROLOFF (1985) beschriebenen Blatt- und Zweiganomalien: Kleinblättrigkeit und Blattrollung, sowie frühzeitige Blattverfärbungen, Blattfall im grünen Zustand und fehlender Austrieb einzelner (Rand-) Zweige. Als Zweiganomalien gelten die Krümmung der Zweige letzter Ordnung (Krallenbildung), sowie Unterdrückung des Längenwachstums und der Verzweigung zugunsten der Bildung von Kurztrieben (Peitschenbildung, an der Kronenperipherie gehäuft auftretend). Im fortgeschrittenen Krankheitsstadium kam es vermehrt zur vollständigen Entlaubung und zum Absterben ganzer Kronenpartien.

Diese einzelnen Schadsymptome traten in der Regel im unterschiedlichen Ausmaß auf den einzelnen Probeflächen auf. Kleinblättrigkeit und Blattrollung konnten ohne Ausnahme in allen Probeflächen beobachtet werden. Trieb-

anomalien traten vermehrt in Wolfratshausen auf. Auf den anderen Probeflächen zeichneten sich diese vielmehr durch das Absterben ganzer Kronenteile aus.

Probefläche		1	2	NR		T	S	W	NR 3a (gefallte Bäume)
				3a	3b				
Anzahl	+	3	3	4	4	5	4	1	2
	-	2	3	4	5	2	3	1	2
mittlere Schadklasse (Jahr)	+	0,0	0,0	0,5	0,5	0,3	0,5	0,0	0
	-	2,0 (83)	2,3 (83)	2,3 (83)	2,2 (85)	2,0 (84)	2,7 (84)	3,0 (85)	2 (84)
mittl. BHD	+	22	29	22	28	3	42	49	20
	-	27	26	23	27	38	46	45	22
Lage im Be- stand (+u.-)		im Bestand				im Bestand	Rand- bäume		im Bestand

Tab. 3: Merkmale der Probebäume

Die Zuordnung der Probebäume zu einer Schadklasse (0-4, FORSCHUNGSBEIRAT WALDSCHÄDEN/LUFTVERUNREINIGUNGEN, 1984) erfolgte anhand des Belaubungsgrades. Zur Bildung der Gruppe "geschädigt" (-) wurden eindeutig geschädigte Bäume der Schadklasse 2 ("mittelstark geschädigt", 26 bis 60 % Blattverlust) und 3 ("stark geschädigt", über 60 % Blattverlust) ausgesucht. Offensichtlich absterbende Bäume der Schadklasse 3 blieben unberücksichtigt. Das Vergleichskollektiv "gesund" wurde aus Bäumen der Schadklassen 0 (bis 10 % Blattverlust) sowie 1 ("schwach geschädigt", 11 bis 25 % Blattverlust), wenn dies zur Bildung einer größeren Gruppe sinnvoll erschien, gebildet.

Die Probebäume der Flächen NR 1, 2 und 3a wurden anhand der im Jahr 1983 von SUMMERER (1986) durchgeführten Schadansprache ausgesucht. Die Schadklassen der Probebäume auf der Fläche Wolfratshausen (W) wurden von der Bay. Forstl. Versuchs- und Forschungsanstalt (KENNEL,

1984, Pers. Mitteilung) übernommen. Die Ansprache der Probebäume der anderen Flächen (NR 3b, T und S), sowie eine erneute Ansprache auf der Fläche NR 3a im Jahr 1985 wurde vom Autor jeweils ca. ein Monat nach Laubausbruch durchgeführt. Bei der letztgenannten Aufnahme wurde bei einem Baum die Besserung des Gesundheitszustandes (von Schadklasse 3 zu Sch.Kl. 2) festgestellt.

Für die Auswahl der Probebäume fanden folgende Kriterien Berücksichtigung:

- Die kranken und gesunden Bäume bzw. Baumgruppen sollten hinsichtlich der Bodenverhältnisse, besonders Mächtigkeit der Humushorizonte (Anhand von Probebohrungen vor dem Aussuchen der Probebäume überprüft), der orographischen Bedingungen, des Stammdurchmessers und der Stellung (mit- bis vorherrschende Bäume) sowie Lage im Bestand (Randbäume!) weitgehend übereinstimmen.
- Sie sollten keine Stamm- oder Kronenschäden aufweisen, die auf eine bekannte Ursache zurückzuführen wären (Ernteschäden, Insektenbefall, Befall durch Mikroorganismen).
- Die Probebäume sollten möglichst weit (mindestens 5 m) von den benachbarten Buchen stocken. In Mischbeständen wurden sie aus reinen Buchengruppen ausgesucht.

Aus den oben genannten Gründen mußte auf der Probefläche Wolfratshausen (W) auf zwei einzelstehende Bäume und in Schierling (S) auf Randbäume zurückgegriffen werden .

3.2 WURZELUNTERSUCHUNGEN AN ALTBÄUMEN

Zweck dieser Untersuchungen war, die Verfallserscheinungen des Feinwurzelsystems als Symptom der neuartigen Erkrankung der Buche mittels Paarvergleichen zu quantifizieren.

Neben der Untersuchung des Kurzwurzelbesatzes, insbesondere der Mykorrhiza, wurden die Bio- und Nekromasse der Feinwurzeln bestimmt. Schließlich sollte in einem begrenzten Versuch die Regenerationsfähigkeit von gesunden und geschädigten Bäumen mittels der "ingrowth cores-Methode" überprüft werden.

3.2.1 Probenahme

Die schonendste und für umfangreiche Feinwurzeluntersuchungen am häufigsten angewandte Methode ist die Entnahme von Bohrkernen mittels eines Wurzelbohrers. Auf diese Weise kann, im Gegensatz zur sehr arbeitsintensiven Profilwandmethode (BÖHM u. KÖPPKE, 1979), eine zur statistischen Absicherung erforderliche größere Probenanzahl verarbeitet werden. Darüber hinaus wird eine wiederholte Probenahme an den gleichen Probepflanzen und ein genauer Bezug zum Bodenvolumen möglich.

HILF (1927) zeigte, daß das Herzwurzelsystem der Buche in dem nahe am Stamm gelegenen Bodenraum seine maximale Dichte erreicht. Sein Umfang stimmt in etwa mit der Kronenprojektion überein. Es sollte auch sichergestellt werden, daß nur Wurzeln von den ausgewählten Probebäumen entnommen wurden. Eine auf der Fläche NR 2 durchgeführte Untersuchung zeigte, daß die Feinwurzelmasse des humosen Bodens eine etwas geringere Streuung bei 150 cm Entfernung vom Stamm als bei 70 cm aufwies. Aus diesem Grund wurde dieser Abstand von 150 cm für sämtliche Untersuchungen gewählt.

Nach Entfernung der wurzelfreien Streuauflage (Ol-Horizont) wurden jeweils von der gesunden (+) und kranken (-) Baumgruppe 12 bzw. 15 Bodenzylinder mittels eines Bohrzylinders (Durchmesser 3,5 cm) bis zu einer Tiefe von 20 cm gewonnen. Das Probenvolumen betrug 192 ml.

Zur Untersuchung der Regenerationsfähigkeit des Feinwurzelsystems wurden auf den Probeflächen NR 3a und NR 3b die Bohrlöcher mit einem Torf-Vermikulit-Gemisch (1:2) aufgefüllt ("Ingrowth cores-Methode" n. PERSSON, 1980). Diese wurden nach einer Vegetationsperiode in gleicher Weise wie die Bodenkerne herausgestochen und ausgewertet.

Diese Untersuchungen fanden an folgenden Terminen statt:

NR 3a: aufgefüllt 6.85, ausgewertet 6.86

NR 3b: aufgefüllt 8.85, ausgewertet 6.86

Zur kurzen Charakterisierung des Feinwurzelsystems in tieferen Bodenschichten wurden schließlich von mittels Seilzug entwurzelten Bäumen Proben entnommen. Die Proben stammen von 2 gesunden und 2 geschädigten Bäumen der Fläche NR 3a aus dem Bv-Horizont in einer Tiefe von 15 und 50 cm.

Probenanzahl: 2 x 8 pro Baum

Probenvolumen: ca. 100 ml

Probetermin: Mai 1984

3.2.2 Wurzelgewinnung

Bis zur Auswertung, die meistens sofort, spätestens eine Woche nach dem Sammeln erfolgte, wurden die Proben im Kühlschrank bei 4 °C aufbewahrt.

Zur Bestimmung des Bodenvolumens wurden die Horizontmächtigkeiten gemessen. Die Horizontfolge jeder Probefläche ist aus den Tabellen 1 u. 2 (Kap. 2) zu entnehmen. Anschließend wurden die Bodenzylinder in ihre einzelnen Horizonte zerlegt und daraus Mischproben hergestellt.

Die vollständige, möglichst zeitsparende Trennung der Feinwurzeln vom Humus- und Bodenmaterial stellt eine besondere methodische Schwierigkeit dar (WELLER, 1983). Für

diesen Vorgang bieten sich verschiedene Wege an. Die meist unvollständige manuelle Auslese schied für die überaus feinen Buchenwurzeln aus. MURACH (1984) trennte die Fichten-Feinwurzeln gravimetrisch mit Hilfe eines aufsteigenden Wasserstroms. EICHHORN (1987) stellte in ähnlichen Untersuchungen jedoch fest, daß mit dieser Methode ca. 70 % der leichteren, toten Feinwurzeln zur Humusfraktion zugerechnet und dadurch der Auswertung entzogen wurden. Die Wurzelgewinnung erfolgte daher in dieser Arbeit nach der üblichen Siebmethode, die den Vorteil hat, daß das gesamte in Frage kommende Material von der Bodenfraktion getrennt werden kann.

Eine Voruntersuchung, durchgeführt mit den Maschenweiten 2,0, 1,0 und 0,5 mm, hatte ergeben, daß erst das 0,5 mm-Sieb das gesamte Feinwurzelmaterial, einschließlich der abgebrochenen Mykorrhizen und der nekrotischen Wurzelbruchstücke zurückhielt. Alle weiteren Untersuchungen erfolgten daher mit dem 0,5 mm-Sieb.

Nach ca. 5-minütigem Einweichen im Wasser wurden die Proben unter nicht zu starkem Wasserstahl vom Mineralboden befreit. Die im Sieb zurückgehaltene Mineralbodenfraktion wurde erneut im Wasserbad von der organischen Fraktion (Wurzeln und Humusbestandteile) gravimetrisch getrennt.

Je nach Beschaffenheit der Humusaufgabe enthielt das Filtrat einen z.T. hohen Anteil an Humuspartikeln (zwischen 5 und 70 %). Ein gröberes Sieb hätte jedoch den Verlust vieler Feinwurzeln zur Folge gehabt. Um möglichst repräsentative Werte zu ermitteln, wurde der zurückgehaltene Humusanteil in die Auswertung einbezogen.

3.2.3 Auswertung

Die Auswertung erfolgte am Präpariermikroskop bei 20-facher Vergrößerung.

Sie richtete sich nach der von KÖSTLER et al. (1968) vorgenommenen Wurzelgliederung:

- Schwachwurzeln (Durchm. 2-5 mm)
- Feinwurzeln (Durchm. < 2 mm), unterteilt in
 - Feinwurzeln i.e.S. (Durchm. 1-2 mm)
 - Feinstwurzeln (Durchm. <1 mm)

und erfolgte getrennt für jede Durchmesser-Klasse.

Das anschließend bestimmte Massenverhältnis Feinstwurzeln/ Feinwurzeln i.e.S. war jedoch von hohen Streuungen belastet. Deshalb werden die errechneten Werte als (gewichteter) Summenwert aller Wurzeln der Durchmesser-Klasse 0 - 2 mm dargestellt. Diese Wurzelfraktion wird als "Feinwurzeln" bezeichnet. Die Ergebnisse beziehen sich daher auf folgende Durchmesser-Klassen:

- Schwachwurzeln (Durchmesser 2 - 5 mm)
- Feinwurzeln (Durchmesser < 2 mm).

3.2.3.1 Bestimmung von Biomasse und Nekromasse der Schwach- und Feinwurzeln

Die Unterscheidung zwischen lebenden und abgestorbenen Wurzeln geschah anhand folgender morphologischer Merkmale:

- lebende Wurzeln sind biegsam und besitzen einen hellen Zentralzylinder. Sie sind meist reichlich verzweigt und durch lebende, meist mykorrhizierte Kurzwurzeln erkennbar.

- Tote Wurzeln weisen meist eine brüchige Rinde auf. Sie sind durch ihren bräunlich verfärbten Zentralzylinder, ihre mangelnde Verzweigung, sowie zahlreiche nekrotische Reste früherer Seitenwurzeln gekennzeichnet. Außerdem fehlen jegliche lebenden Mykorrhizen.

Sämtliche Totwurzelbruchstücke wurden ohne Festsetzung einer Mindestlänge zur Nekromasse gezählt.

Die Feinwurzeln (1-2 mm) und, an einigen Probeterminen, die Schwachwurzeln, wurden vollständig ausgewertet. Der Rest der Mischprobe, bestehend aus den Feinstwurzeln (<1 mm) und den zurückgehaltenen Humusteilen, wurde nach Zerkleinerung (ca. 2 cm lange Stücke) in einer Schale, deren Boden in 100 1 x 1 bzw. 2 x 2 cm große Quadrate unterteilt war, gleichmäßig verteilt. Mit Hilfe von Zufallszahlen wurde nach der von MARKS et al. (1968) beschriebenen Methode 7 von 100 Proben ausgesucht und anschließend ausgewertet.

Nach Trocknung (10 Stunden bei 70° C wurden aus den ermittelten Wurzelmassen folgende "Merkmale" bestimmt (nach Abzug des errechneten Humus-Gewichtsanteils):

- für Schwachwurzeln (2-5 mm):

Anteil abgestorbener Wurzeln in % der Wurzelgesamt-
masse (Biomasse + Nekromasse)

- für Feinwurzeln (<2 mm):

Biomasse in g/100 ml Boden

Nekromasse in g/100 ml Boden

Anteil abgestorbener Wurzeln in % der Wurzelgesamt-
masse

Alle Wurzelmassen sind Trockengewichte.

3.2.3.2 Bestimmung der Kurzwurzelmerkmale

Bei der Untersuchung des Kurzwurzelbesatzes der lebenden Feinstwurzeln wurden folgende Fraktionen ausgewiesen:

- Nicht mykorrhizierte, lebende Kurzwurzeln
- Mykorrhizierte Kurzwurzeln, getrennt nach
 - lebenden Mykorrhizen und
 - abgestorbenen Mykorrhizen.

Die Zuordnung der Kurzwurzeln zu den einzelnen Fraktionen erfolgte anhand folgender Merkmale:

- Nicht mykorrhizierte Kurzwurzeln sind an ihren Wurzelhaaren zu erkennen. Sie sind meist schlanker und länger als Mykorrhizen. Tote und absterbende, nicht mykorrhizierte Kurzwurzeln werden vermutlich sehr rasch von den Langwurzeln abgetrennt und abgebaut. Es wurden aus diesem Grund fast ausschließlich lebende Wurzeln, die eine helle, turgeszente Spitze besaßen, gezählt.
- Lebende Mykorrhizen besitzen eine turgeszente, vom Mantel nicht bedeckte Spitze, sofern ihr Wachstum nicht abgeschlossen ist. Sie weisen oft eine hellere Farbe als nekrotische Mykorrhizen und eine glatte oder granulöse Oberfläche auf. Auf dieser sind meist Hyphen oder Hyphenstränge zu erkennen. Lebende Mykorrhizen besitzen oft eine weitgehend intakte Verzweigung.
- Abgestorbene Mykorrhizen zeigen auf keinen Fall eine turgeszente Wurzelspitze. Sie sind meist von dunkler Farbe. Die Manteloberfläche ist manchmal wellig geschrumpft. Wegen ihrer Brüchigkeit fehlen bei abgestorbenen Mykorrhizen zahlreiche, an den Narben zu erkennende Verzweigungen.

Aufgrund von Verfärbungen durch Humusstoffe traten zum Teil Unsicherheiten in der Beurteilung der Vitalität der Mykorrhizen, insbesondere in den humushaltigen Horizonten auf. In Zweifelsfällen wurden die Mykorrhizen zu den abgestorbenen gezählt. Im Hinblick auf die Schwierigkeiten bei der genauen und objektiven Bestimmung der Vitalität von Mykorrhizen anhand morphologischer Merkmale wurde auf eine noch stärker differenzierte Aufnahme verzichtet.

Aus den gewonnenen Daten wurden folgende "Merkmale" errechnet:

- Mykorrhizierungsgrad (%) = $\frac{\text{Zahl lebender Mykorrhizen}}{\text{Zahl lebender mykorrhizierter und nicht mykorrhizierter Kurzwurzeln}}$

- Anteil lebender Mykorrhizen (%) = $\frac{\text{Zahl lebender Mykorrhizen}}{\text{Zahl lebender und abgestorbener Mykorrhizen}}$.

Bezogen auf die lebende Feinwurzelmasse wurden ferner errechnet:

- Relative Mykorrhizenzahl: $\frac{\text{Anzahl lebender Mykorrhizen}}{\text{pro g lebender Feinwurzeln}}$

- Relative Kurzwurzelzahl: $\frac{\text{Gesamtanzahl der Kurzwurzeln}}{\text{pro g lebender Feinwurzeln}}$

Bezogen auf das ermittelte Bodenvolumen wurden bestimmt:

- Absolute Mykorrhizenzahl: $\frac{\text{Anzahl lebender Mykorrhizen}}{\text{pro 100 ml Boden}}$

- Absolute Kurzwurzelzahl : $\frac{\text{Gesamtanzahl der Kurzwurzeln}}{\text{pro 100 ml Boden}}$

Von verzweigten Mykorrhizen wurden die Wurzelspitzen gezählt und gingen als "Mykorrhizen" in die Errechnung der Merkmale ein.

Im Oktober 1984 wurde für die Fläche NR 3a das Mykorrhizengewicht bestimmt. Dazu wurden von den Feinwurzelmischproben für jeden Horizont von (+) und (-) Bäumen jeweils 3x100 lebende Mykorrhizen zufällig entnommen, getrocknet und gewogen.

3.2.3.3 Statistische Absicherung der Ergebnisse

Für die arbeitsintensiven wurzelökologischen Untersuchungen wurden Verfahren der Probenahme und -verar-

beutung entwickelt, die auf eine Reduzierung des Aufwands bei erhöhter Relevanz der Ergebnisse abzielten.

Wie bereits beschrieben, erfolgte die Probenahme stufenweise. Zunächst wurden Bodenproben (Bodenzyylinder) nach einem vorgegebenen Muster aus dem Bestand entnommen. In einem zweiten Schritt wurde daraus eine Feinwurzel-Mischprobe gebildet und schließlich eine bestimmte Anzahl Zufallsproben entnommen.

Voraussetzung für die Absicherung der erzielten Ergebnisse war die Festsetzung der erforderlichen Mindestprobenanzahl. Im folgenden soll das Verfahren dieser Bestimmung für die zwei Schritte der Probenahme dargestellt werden.

- Probenahme im Bestand

Die Ermittlung der erforderlichen Anzahl Bohrkerne wurde im Probestand NR 3a im Mai 1984 getrennt für jeden Horizont (O, Ah, Bv) an jeweils 2 Baumgruppen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde die Feinwurzelgesamtmasse (lebende + abgestorbene Feinwurzeln mit Durchmesser < 2 mm), ausgedrückt in mg / 100 ml Boden, durch Vollausswertung einer Mischprobenreihe aus 10, 12 und 15 Bohrkernen bestimmt.

Im Durchschnitt der 6 Aufnahmen wurden folgende mittlere prozentuale Abweichungen der Wurzelmasse einer Mischprobe zur nächstgrößeren ermittelt:

10 zu 12 Proben: $\pm 13,3 \%$ ($-31,5 \%$ / $+9,0 \%$)

12 zu 15 Proben: $\pm 3,2 \%$ ($-4,0 \%$ / $+4,8 \%$)

Bei allen Horizonten beider Baumgruppen wurden etwa gleich hohe Abweichungen gemessen.

Aufgrund der geringfügigen Änderung der Ergebnisse ab 12 Bohrkernen wurde diese Zahl zunächst als Mindestprobenzahl festgesetzt (1983/84). Um die Sicherheit der

Ergebnisse noch weiter zu erhöhen, wurde 1985/86 diese Zahl auf 15 erhöht.

- Entnahme von Teilproben

Pro 100 Proben wurden 7 Zufallsproben für die Auswertung herangezogen. Diese Zahl wurde in vergleichbaren Untersuchungen als ausreichend für eine Absicherung der Ergebnisse bestimmt (MARKS et al., 1967; SCHENK, 1982; FOGEL und HUNT, 1979; SCHENK, 1982). Ob diese Probenanzahl auch für Untersuchungen an Buchenwurzeln ausreichend ist, wurde nach dem von STAUFFER (1982) beschriebenen statistischen Verfahren geklärt.

Darin erfolgt die Bestimmung der erforderlichen Probenanzahl anhand des Variationskoeffizienten ($VK \% = s.100 \% / \text{Mittelwert}$) und des prozentualen Fehlers der Probe ($PE \% = s.t.100 \% / n. \text{Mittelwert}$), abgeleitet aus dem Fehler des Mittelwertes. In Abhängigkeit von diesen 2 Größen wird in tabellarischer Form die erforderliche Anzahl Proben angegeben, die eine gewünschte Wahrscheinlichkeit garantiert.

Die statistischen Kennwerte wurden für folgende Merkmale errechnet:

- Anteil abgestorbener Feinwurzeln
- Relative Mykorrhizenzahl
- Mykorrhizierungsgrad
- Anteil lebender Mykorrhizen

Die zwei ersten Merkmale wurden exemplarisch für die Aufnahmetermine NR 3a/9.84 und T/10.84 an jeweils 2 Horizonten von + und - Bäumen, d.h. aus insgesamt jeweils 8 Aufnahmen errechnet. Die Daten für den Mykorrhizierungsgrad und den Anteil lebender Mykorrhizen stellen jeweils den Mittelwert aus 68 Aufnahmen in 4 Probebestände (NR, T, S und W) dar.

Folgende Variationskoeffizienten (VK %) und erforderliche Probenanzahlen (für eine 95 %-ige Sicherheit) wurden ermittelt:

	erforderl. Probenanzahl	VK %
Anteil abgest. Feinwurzeln	8,1 \	42,4
relative Mykorrhizenzahl	8,0	61,7
Mykorrhizierungsgrad	7,9	21,7
Anteil leb. (abgest.) Mykorrh.	7,8 (7,8)	46.8(23,7)

Die in dieser Arbeit mit 7 Proben erzielten Ergebnisse gelten also mit einer nahe 95 %-igen Wahrscheinlichkeit als gesichert.

3.3 WURZELUNTERSUCHUNGEN AN JUNGPFANZEN

In diesen Untersuchungen sollte geprüft werden, ob in geschädigten Buchen-Altbeständen auch am Buchenjungwuchs Wurzelschäden auftreten. Parallel zur Aufnahme des Feinwurzelsystem erfolgte eine Ansprache der Vitalität der Blätter.

Die Untersuchungen fanden an 1- und 2-jährigen Pflanzen in den Probeständen Erlangen (E) und Neureichenau (NR) statt. Zeitpunkte der Probenahmen waren Sept. 1984 und August 1985.

Unmittelbaren Anlaß zu den Untersuchungen in Erlangen gaben verstreut im ganzen Forstamt auftretende Schäden an den Blättern von Jungbuchen aller Altersstufen. Daher erfolgte die Schadklassen-Einteilung in diesem Bestand ausschließlich anhand von Blattmerkmalen.

Folgende Blattmerkmale fanden bei der Ansprache Berücksichtigung:

- Belaubungsdichte
- Blattgröße

- Nekrosen, Verfärbungen.

Im Zentrum dieser Untersuchung stand wiederum die Frage, ob und in welchem Umfang Zusammenhänge zwischen dem Gesundheitszustand der Assimilationsorgane und dem des Wurzelsystems existieren.

Im Vergleich zu einem als "normal" definierten Zustand wurde jede Pflanze anhand dieser Merkmale angesprochen. Verwendung fanden nur stark geschädigte (spärliche Belaubung, geringe Blattgröße, Verfärbungen) und "gesunde" Pflanzen (alle Merkmale mit "normaler" Ausprägung).

Die pathologische Situation in Neureichenau (NR 3) veranlaßte zur Anwendung einer davon abweichenden Methode der Probenahme: Schäden am oberirdischen Teil der Jungpflanzen kamen nur abgeschwächt vor. Eine Bonitierung anhand der besprochenen Schadmerkmale erwies sich aufgrund des einheitlicheren Erscheinungsbilds der gesamten Naturverjüngung als unzweckmäßig. Die Schadansprache wurde deswegen erst im Labor anhand von Wurzelschädigungen vorgenommen (nach GEHRMANN, 1983).

Der Schwerpunkt dieser Untersuchung lag deswegen auf der genauen Quantifizierung der Wurzelschäden. Insbesondere wurde auf Zusammenhänge zwischen den Langwurzelschäden und Merkmalen des Kurzwurzelbesatzes geachtet.

Im Kronenbereich von Altbuchen gewachsene Pflanzen wurden mit der Grabgabel ausgehoben. Von der Fläche Erlangen wurden 12 "gesunde" (+) und 12 "geschädigte" (-) Pflanzen entnommen. Von 100 auf der Probefläche NR 3 entnommenen Pflanzen wurden im Labor 26 als "gesund" und 30 als "geschädigt" eingestuft.

Für jede Pflanze getrennt wurden das Trockengewicht (10 Std. bei 106 °C) vom Sproß und von den lebenden Feinwurzeln (Durchmesser < 2 mm) bestimmt und daraus das Sproß/Wurzelverhältnis gebildet. Der Kurzwurzelbesatz

wurde an 7 Teilproben (aus einer Mischprobe) untersucht (vgl. 3.2).

Daraus wurden folgende Merkmale errechnet (vgl. 3.2.3.2):

- Mykorrhizierungsgrad
- Anteil lebender Mykorrhizen
- Relative Mykorrhizenzahl

Zur statistischen Prüfung der Ergebnisse wurde für das Sproß/Wurzel-Verhältnis und für die Kurzwurzel-/Mykorrhizenmerkmale ein T-Test angewandt.

3.4 SUBSTRATVERSUCHE

Versuchszweck war, den Einfluß verschiedener Substrate aus geschädigten Buchenbeständen auf die Entwicklung des Feinwurzelsystems von Buchenkeimlingen zu untersuchen.

Geprüft wurden das Bodenmaterial aus dem Stammabflußbereich von gesunden (+) und geschädigten (-) Altbuchen, sowie aus einer nahegelegenen, von Traufwasser unberührten Lichtung des gleichen Bestands.

Die Erde stammt aus dem oberen Wurzelraum, getrennt nach "Humus-" (= O + Ahe) und "Mineralboden" (= Bv bis -20 cm) von jeweils 5 Altbuchen aus den Probeflächen NR 2 ("Glashüttenhäng") und NR 3a ("Jägerkopf", beide Bayerischer Wald), sowie einer gesunden Buche im Forstbotanischen Garten in Grafrath. Die Behandlung "Freiland" (Fr) wurde mit einer Mischprobe aus ebenfalls mehreren Entnahmestellen durchgeführt. Nach gründlicher Durchmischung und Homogenisierung der Substrate wurden die Mischproben mit zerschnittenen Buchenfeinwurzeln aus dem entsprechenden Horizont als zusätzliches Mykorrhiza-"Impfmateriale" ange-reichert.

Das Bodenmaterial wurde anschließend in Kunststoff-containern abgefüllt (Füllhöhe 20 cm) und mit je einem im

Labor vorgekeimten Buchecker (Herkunft 81014/ Geisenfeld) bestückt.

Von jeder Behandlung wurden jeweils 3 Blöcke gebildet und in wechselnder Reihenfolge auf der Versuchsanlage angeordnet.

Die Bewässerung erfolgte von Hand mit Leitungswasser nach okularer Einschätzung des Bedarfs.

Zur Auswertung wurden sämtliche Pflanzen gleichzeitig entnommen und nach gründlicher Reinigung des Wurzelsystems unter fließendem Wasser bei -20°C eingefroren.

Bei der anschließenden Auswertung wurden folgende Merkmale erfaßt:

- Gesamtpflanzentrockengewicht
 - Feinstwurzelrockengewicht (Durchmesser $< 1\text{ mm}$)
 - Relative Mykorrhizenzahl
- (zur Methode vgl. Abschnitt 3.2.3.2)

Von jedem Substrat wurden getestet:

- Humus und Mineralboden, jeweils getrennt
- Humus + Mineralboden (10+10 cm im selben Container)

2 Versuchsreihen fanden statt:

- Glashüttenhäng

Aussaat : Mai 1983

Auswertung : November 1983

Testsubstrate : - gesund (+)
 - geschädigt (-)
 - Grafrath (Gr +)

Pflanzenanzahl pro Behandlung : 20

Dieser Versuch fand im Forstbotanischen Garten Grafrath statt.

- Jägerkopf

Aussaat : Mai 1984

Auswertung : Juli 1985

Testsubstrate: - gesund (+)
 - geschädigt (-)
 - Freiland (Fr)

Pflanzenzahl pro Behandlung : 30

Dieser Versuch fand im Gewächshaus des Instituts in München statt. Zur Untersuchung der weiteren Entwicklung wurde die Behandlung "Humus+Mineral" (+ und -) in zwei Schritten ausgewertet:

- 20 Pflanzen im Juli 1985

Versuchsdauer: 14 Monate

- 15 Pflanzen im Mai 1986

Versuchsdauer : 24 Monate

In den Jahren 1984 bis 1986 wurde nach dem gleichen Muster im Grafrather Garten ein weiterer Substratversuch (in natürlichem Substrat) für die Probeflächen NR 3a, T und W angelegt; darüber hinaus fanden Wuchsversuche in Einheitserde auf den Flächen NR 3a, NR 4 und W statt, in denen der Gesamteinfluß der Umweltparameter am jeweiligen Versuchsort getestet werden sollte.

Bei der ersten Versuchsreihe (natürliches Substrat) trat eine starke Verdichtung in den dafür verwendeten 5-Liter-Töpfen ein. In den Wuchsversuchen mit Einheitserde blieb die Mykorrhizierung trotz Beimpfung der im Bestand angelegten Beete aus, so daß die Auswertung in beiden Fällen unterbrochen wurde. Auf eine Darstellung der gewonnenen Ergebnisse wurde deswegen verzichtet.

3.5 CHEMISCHE ANALYSEN

Bestimmt wurden die Elementgehalte der Feinwurzeln (Durchmesser < 2 mm) von gesunden und geschädigten Altbüchen, sowie das Nährstoffangebot und die Azidität des aus dem Wurzelraum gewonnenen Bodensubstrates.

Mit diesen Untersuchungen sollte geprüft werden, ob Schädigungen des Feinwurzelsystems und der Assimilationsorgane parallel zu Veränderungen der chemischen Zusammensetzung der Feinwurzeln verliefen. Ferner stellte sich die Frage, inwiefern diese Schädigungen einen Zusammenhang mit dem Bodenchemismus zeigten.

Stets wurden die Analysen an denselben Bäumen durchgeführt, die auch zur Untersuchung der Wurzelmasse und der Kurzwurzelmerkmale dienten. Die Entnahme der Wurzel- und Bodenproben erfolgte jeweils für jede Fläche stets zum selben Termin.

Parallel für Boden und Feinwurzeln wurden die Gehalte an K, Ca, Mg, Mn und Al bestimmt. Von den Feinwurzeln wurden darüber hinaus die P-Gehalte, auf 2 Probeflächen ebenfalls N und S ermittelt. Diese Untersuchungen konnten nur exemplarisch für einige Probeflächen an jeweils einem Probetermin stattfinden. In NR und W fanden sie sowohl am Boden wie an den Feinwurzeln statt, für die Probefläche Schierling (S) erfolgten lediglich Wurzelanalysen.

Im Mittelpunkt stand der Paarvergleich (+/-) auf demselben Standort (NR 3b, W, S). Ergänzend dazu wurden Analysen an Bäumen durchgeführt, die in einem geschädigten (NR 3a) bzw. symptomfreien Bestand (NR 4) stockten. Zusätzlich zum Stammabflußbereich wurden hier Bodenanalysen in einer nahegelegenen Freilandparzelle durchgeführt.

Die Probenahme erfolgte zu folgenden Terminen:

- NR 3b : 10.85

- NR 3a : 5.84
- NR 4 : 5.84
- W : 10.85
- S : 10.85

3.5.1 Bodenanalysen

Als Untersuchungsmaterial dienten jeweils 10 zu diesem Zweck entnommene Bohrkerne (Tiefe 20cm). Nach Entfernung der Streuauflage wurden daraus Mischproben für den humushaltigen Oberboden ($H = O+Ah/Ahe$) und den humusfreien Mineralhorizont ($Bv/Ae/Al$) gebildet. Nach Entfernung der Wurzeln wurden die Proben luftgetrocknet, gesiebt (Maschenweite 2 mm) und bis zur Auswertung in verschlossenen Gläsern aufbewahrt.

Der pH-Wert wurde in 0,01 M $CaCl_2$ am pH-Meter (Metrohm E-512) durch 2 Parallelmessungen bestimmt.

Alle weiteren Analysen wurden vom Institut für Bodenkunde und Waldernährungslehre in München durchgeführt.

Die Extraktion erfolgte mit 0,5 NH_4Cl (Boden: Extraktionslösung = 1:40).

Zur Elementenkonzentrations-Bestimmung fanden folgende Analyseverfahren Verwendung:

- H^+ : Endpunkttitration mit NaOH 0,05 n
(Titroprozessor Metrohm 682)
- K : Flammenphotometer (Eppendorf)
- Ca, Mg, Mn, Fe, Al : Atomabsorptionsphotometer
(Perkin Elmer 380)

Es wurden jeweils 2 Parallelmessungen durchgeführt.

3.5.2 Wurzelanalysen

Zur Analyse der Feinwurzeln (Durchmesser < 2 mm) von Altbäumen wurde das gleiche Material verwendet, das zu den Massen- und Kurzwurzeluntersuchungen diente (Mischproben aus 12 oder 15 Bohrzyindern).

Die Proben aus allen Horizonten wurden gründlich vermischt. Bestimmt wurden auf diese Weise die durchschnittlichen Gehalte an Feinwurzeln in den oberen 20 cm Böden (Humusauflage inbegriffen).

MURACH (1984) ermittelte unterschiedliche Elementgehalte (v.a. an K, Mn, Fe und Al) in lebenden und abgestorbenen Feinwurzeln. Entsprechende Untersuchungen wurden in dieser Arbeit an Buchenwurzeln durchgeführt. Es wurden durchwegs leicht erhöhte Gehalte von allen Elementen, einschließlich des rasch freigesetzten Kaliums, in den toten Feinwurzeln ermittelt. Dieses Ergebnis läßt auf eine starke Verschmutzung der brüchigen, meist sehr feinen abgestorbenen Buchenwurzeln schließen. Aus diesem Grund wurde auf die Darstellung der Ergebnisse verzichtet. Um ein zuverlässiges Bild über das tatsächlich stattfindende Ausmaß der Nährstoffaufnahme zu erhalten, wurden lebende Wurzeln allein analysiert. Wegen der verschiedenen Anteile an lebenden und abgestorbenen Wurzeln bei unterschiedlich geschädigten Bäumen war ebenfalls nur auf diese Weise ein Vergleich der Probebäume untereinander möglich.

Die lebenden Feinwurzeln wurden aus der Mischprobe nach okularer Schätzung herausgesucht und unter dem Wasserstrahl sorgfältig gewaschen. Die vollständige Befreiung von Humus- und Mineralpartikeln erfolgte schließlich für die benötigte Wurzelmenge (2 g) unter dem Binokular. Sämtliche Proben wurden 16 Stunden bei 70° C getrocknet.

Die weitere Verarbeitung übernahm der Lehrstuhl für Forstpflanzenzüchtung und Immissionsforschung in München.

Der Probenaufschluß erfolgte nach dem Mahlvorgang (Korngröße $< 0,006$ mm) im Naßveraschungsverfahren ("Büchigedigestor 445"). Die Elementenanalyse erfolgte am ICP Spektralanalysen-Gerät (induktiv gekoppeltes Plasma) Plasmakon 535 (Fa. Kontron). Die N-Gehalte wurden nach KJELDAHL ermittelt. Die Bestimmung von Schwefel erfolgte ionenchromatographisch (BARTONEK und WERNER, 1983).

Jede Analyse wurde an einer Mischprobe durchgeführt.

3.6 WURZELPATHOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

Zur Klärung der Frage, inwiefern Wurzelpathogene an den Degradationserscheinungen des Feinwurzelsystems beteiligt sind, wurde versucht, Pilze aus geschädigten Wurzeln zu isolieren und zu bestimmen.

Im Oktober 1986 wurden Isolierungen aus 5 geschädigten Altbäumen durchgeführt. Eine Wiederholung fand im November 1986 statt. Für diesen Termin wurden 5 gesunde Bäume in die Untersuchung einbezogen.

Die Feinwurzeln wurden getrennt für den Humusboden (Ah) und den Mineralhorizont an 2 Stellen pro Baum ausgegraben.

Sämtliche Wurzeln wurden in Plastikbeuteln verpackt und innerhalb kurzer Frist im Labor weiterverarbeitet. Die Feinwurzeln wurden unter fließendem Wasser gründlich gespült. Pro Baum und Horizont wurde eine Mischprobe gebildet und daraus sechs ca. 2 cm lange, äußerlich unversehrte Wurzelstücke dicht hinter dem abgestorbenen Wurzelende abgeschnitten. Die Oberflächensterilisierung erfolgte durch 30 Sekunden langes Eintauchen in 1 % NaOCl.

Voruntersuchungen zeigten, daß dieses Verfahren eine genügende Oberflächensterilisierung gewährleistete und zugleich kein Abtöten der Buchenfeinwurzeln zur Folge hatte.

Um ein Herauswachsen des Myzels sicherzustellen, wurde anschließend an beiden Enden der Wurzelstücke ein ca. 0,5 cm langer Abschnitt mit einem Skalpell abgetrennt. Schließlich wurden die Wurzeln zweimal in sterilisiertem Wasser gespült.

Die Isolierungen erfolgten auf 2 %-igem Malzagar in Petri-Schalen (9 cm Durchmesser). Jede Platte wurde mit 6 Wurzelabschnitten bestückt.

Insgesamt wurden getestet:

- Oktober 1986: von 5 geschädigten Altbäumen 40
Wurzelstücke
- November 1986: von 5 gesunden Altbäumen 25
Wurzelstücke
von 5 geschädigten Altbäumen 25
Wurzelstücke

Bald nach dem Herauswachsen aus den Wurzelschnittstellen wurden die Myzelien einzeln auf frischen Platten des gleichen Substrats (Malz-Agar) bzw. für Cylindrocarpum auf PDA (potato dextrose agar, DOMSCH; GAMS, 1980) abgeimpft. Die Bestimmung erfolgte nach 3- bis 4- wöchiger Inkubation bei Zimmertemperatur.

4. ERGEBNISSE

4.1 WURZELMERKMALE VON GESUNDEN UND GESCHÄDIGTEN ALTBUCHEN

Im folgenden Abschnitt erfolgt eine vergleichende Darstellung der Fein- und Kurzwurzelmerkmale bei gesunden und geschädigten Altbuchen.

Es wurde versucht, die für alle Bestände gleichzeitig zutreffenden Zusammenhänge herauszuarbeiten. Wert wurde ebenfalls auf die Schilderung jener Verhältnisse gelegt, die eindeutig aus dem festgestellten Trend herausfallen, so wie es wiederholt für die Fläche Wolfratshausen (W) zutraf.

Wegen der Vielfalt der mitwirkenden Standortbedingungen können "Buchenwälder" nur sehr begrenzt als einheitliche Grundgesamtheit angesprochen werden. Mittelwerte, die wie im vorliegenden Fall aus verschiedenen Beständen und Probeterminen gewonnen wurden, besitzen deswegen nur eine relativ schwache Aussagefähigkeit. Es stellte sich jedoch heraus, daß Mittelwerte für viele der erfaßten Wurzelmerkmale ein brauchbares Abbild der erarbeiteten Unterschiede zwischen Schadklassen darstellen. Aus diesem Grund werden, neben der detaillierten Besprechung von Einzelmerkmalen, der Mittelwert aller Bestände und aller Probetermine für das ausgewertete Profil (0-20 cm) kurz dargestellt.

Jedes Merkmal wurde für den gesamten hier untersuchten Abschnitt des Oberbodens (1-20 cm) besprochen und außerdem, wo gesicherte Abweichungen zwischen den einzelnen Horizonten auftraten, getrennt für jeden Horizont. Eine kurze Schilderung der allgemeinen Entwicklung des jeweiligen Merkmals mit zunehmender Bodentiefe unabhängig vom Schädigungsgrad der Probebäume wurde vorangestellt.

Da die vorliegenden Ergebnisse sich auf unterschiedliche Zeitpunkte der Vegetationsperiode, zum Teil auch auf verschiedene Jahre beziehen, konnten keine Schlüsse hinsichtlich der Entwicklung der untersuchten Kenngrößen mit fortschreitender Jahreszeit mit hinreichender Sicherheit gezogen werden.

Die Werte für den humosen Oberboden (H=O+A-Horizonte) und den gesamten untersuchten Abschnitt des Bodenprofils (H+M) sind (nach dem Bodenvolumen gewichtete) Mittelwerte. Im Unterschied zu den direkt bestimmten Werten für die einzelnen Horizonte wurden diese errechneten Größen in den Tabellen und Abbildungen in Klammern gesetzt und als (H) für "Humusboden" und (H+M) bezeichnet.

Ergänzend zu den Feinwurzelmasseuntersuchungen wurden die Bio- und Nekromasse der Schwachwurzeln (2-5 mm Durchmesser) an einigen Probeterminen bestimmt.

Um einen Einblick in die Auswirkungen der Krankheit auf das Tiefwurzelsystem zu bekommen, wurden die wichtigsten Feinwurzelmerkmale von 4 Probebäumen in tieferen Schichten des Bv-Horizontes (-50 cm) bestimmt. Feinwurzeluntersuchungen in einem äußerlich symptomfreien Bestand (NR 4) und der Vergleich mit geschädigten Probeflächen sollten Hinweise zur Klärung der Standortabhängigkeit der Erkrankung liefern.

Abschließend werden die Ergebnisse eines begrenzten Versuchs dargestellt, in dem die Regenerationsleistung des Feinwurzelsystems von gesunden und geschädigten Altbuchen untersucht wurden ("Ingrowth cores").

4.1.1 Wurzelbiomasse und -nekromasse

Gemessen wurden die Masse lebender (Biomasse) und abgestorbener (Nekromasse) Fein- und Schwachwurzeln. Sie werden als Trockengewicht/100 ml Boden angegeben. Um die

Feinwurzelproduktion gesunder und geschädigter Bäume abschätzen zu können, wurde ebenfalls die Gesamtwurzelmasse (= Bio- + Nekromasse) dargestellt. Zur Feststellung der Sterblichkeitsrate von Fein- und Schwachwurzeln wurde schließlich der Anteil abgestorbener Wurzeln diskutiert.

4.1.1.1 Einfluß der Erkrankung auf die Wurzelmasse

Die Biomasse und die Nekromasse der Feinwurzeln veränderten sich bei gesunden wie geschädigten Bäumen mit zunehmender Bodentiefe in gleicher Weise. Stets wurden im humosen Oberboden (H) höhere Wurzelmassen gebildet als im humusfreien Mineralboden (Tab. 4). Zwischen den beiden Horizonten des humosen Oberbodens (O und Ah) konnte dagegen kein eindeutiger Unterschied festgestellt werden.

Probefläche		NR							T	S		W	
		1	2	3a		3b							
Probetermin		11.83	11.83	11.83	9.84	6.85	8.85	10.85	10.84	10.85	4.86	7.85	10.85
Horizont	+	243	134	141	309	668	611	332	360	n.b.	837	291	726
	-	81	110	212	208	298	438	263	252	n.b.	187	577	600
A	+	159	222	239	110	290	220	188	161	n.b.	313	848	703
	-	210	264	138	84	165	241	230	206	n.b.	439	326	305
(H)	+	232	168	210	161	427	400	254	267	430	532	649	710
	-	108	167	160	109	195	326	244	228	224	341	462	470
M	+	90	60	91	44	65	119	130	100	92	116	358	166
	-	71	63	70	36	71	89	62	59	64	157	54	86
(H+M)	+	188	136	155	109	261	267	189	206	239	312	463	383
	-	86	119	121	77	128	238	150	160	137	237	267	297

Tab. 4: Feinwurzelbiomasse (mg/100 ml Boden) von gesunden (+) und geschädigten (-) Altbüchen in den Oberbodenhorizonten O, Ah(e), (H) = O + Ahe, M = humusfreier Mineralhorizont n.b. = nicht bestimmt

Ganz generell wiesen die geschädigten Bäume auf allen Probeflächen eine niedrigere Wurzelbiomasse auf als die gesunden Vergleichsbäume. Im Gesamt-Profil (H+M) betrug die Biomasse der geschädigten Bäume zwischen 46 % (NR 1) und 88 % (NR 2) der Biomasse der gesunden Bäume. Diese Abnahme verlief jedoch nicht gleichmäßig, sondern oft war in einzelnen Horizonten sogar eine mäßig erhöhte Biomasse bei den geschädigten Bäumen festzustellen. Eine solche Zunahme fand meistens im humushaltigen Mineralhorizont Ah (in NR 1, 2 und 3b; T und S), seltener in der Humusauf-lage (O) oder im humusfreien Mineralboden statt. Die für den gesamten humosen Oberboden (H) errechnete Biomasse indessen war bei den gesunden Bäumen stets höher.

Probefläche		NR							T	S		W	
		1	2	3a		3b							
Probetermin		11.83	11.83	11.83	9.84	6.85	8.85	10.85	10.84	10.85	4.86	7.85	10.85
Horizont	+	38	36	32	166	538	647	285	100	n.b.	336	136	387
	-	97	79	15	168	248	833	371	220	n.b.	232	350	384
A	+	48	40	65	65	464	305	244	50	n.b.	175	454	324
	-	582	35	79	95	297	220	190	80	n.b.	232	428	1043
(H)	+	43	37	56	90	491	463	263	77	54	242	340	344
	-	199	62	90	99	286	486	267	146	169	232	386	676
M	+	42	24	38	76	18	104	96	16	17	71	79	171
	-	148	41	65	86	92	98	181	52	57	59	111	196
(H+M)	+	42	33	48	84	293	293	176	54	33	152	177	240
	-	168	52	79	193	183	342	222	108	109	134	254	460

Tab. 5: Feinwurzelnekromasse (mg/100 ml Boden) von gesunden (+) und geschädigten (-) Altbüchen in den Oberbodenhorizonten O, Ah_(e), (H) = O + Ah_(e), M = humusfreier Mineralhorizont n.b. = nicht bestimmt

Die niedrigere Biomasse bei den geschädigten Bäumen war, außer in NR 3a/6.85, S/4.86 und W/10.85, von einer erhöhten Nekromasse begleitet (Tab. 5). Im ausgewerteten

Gesamtprofil (H+M) betrug sie bis zum Vierfachen der Nekromasse der gesunden Bäume (in NR 1). Diese Zunahme verlief meist gleichmäßig im humosen Oberboden (H) und im humusfreien Mineralboden (M).

Die geschädigten Bäume besaßen also gegenüber den gesunden herabgesetzte Biomassen, gleichzeitig aber, aufgrund erhöhter Nekromassen, meist annähernd gleich hohe Feinwurzelgesamtmassen (Tab. 6). Lediglich in NR 3a/6.85 wurde im ausgewerteten Profilabschnitt (H+M) ein drastischer Rückgang der Gesamtmasse bei den geschädigten Bäumen beobachtet. Auf den anderen Probeflächen lagen die Abweichungen in einem engen Bereich zwischen +/-20 %. In vielen Fällen waren die Feinwurzelgesamtmassen der gesunden und geschädigten Bäume nahezu gleich (NR 2, 3a/11.83 und 3b; T).

Probefläche		NR								T	S		W	
		1	2	3a		3b								
Probetermin		11.83	11.83	11.83	9.84	6.85	8.85	10.85	10.84	10.85	4.86	7.85	10.85	
Horizont														
O	+	281	170	173	475	1206	1258	617	460	n.b.	1173	427	1113	
	-	178	189	327	376	546	1271	634	472	n.b.	419	927	984	
A	+	207	222	304	175	754	525	432	211	n.b.	488	1302	1027	
	-	792	264	217	179	462	461	420	286	n.b.	671	754	1348	
(H)	+	275	168	266	251	918	863	517	344	484	774	989	1054	
	-	307	167	250	208	481	812	511	374	393	573	848	1146	
M	+	132	60	129	120	246	223	226	116	109	187	437	337	
	-	219	63	135	122	163	187	243	111	121	216	165	282	
(H+M)	+	230	136	203	193	554	560	365	260	272	464	640	623	
	-	254	119	200	180	311	580	372	268	246	371	521	757	

Tab. 6: Gesamtwurzelmasse (mg/100 ml Boden) (= Biomasse + Nekromasse) von gesunden (+) und geschädigten (-) Altbäumen in den Oberbodenhorizonten von O, Ah_(e), (H) = O + Ah_(e), M = humusfreier Mineralhorizont
n.b. = nicht bestimmt

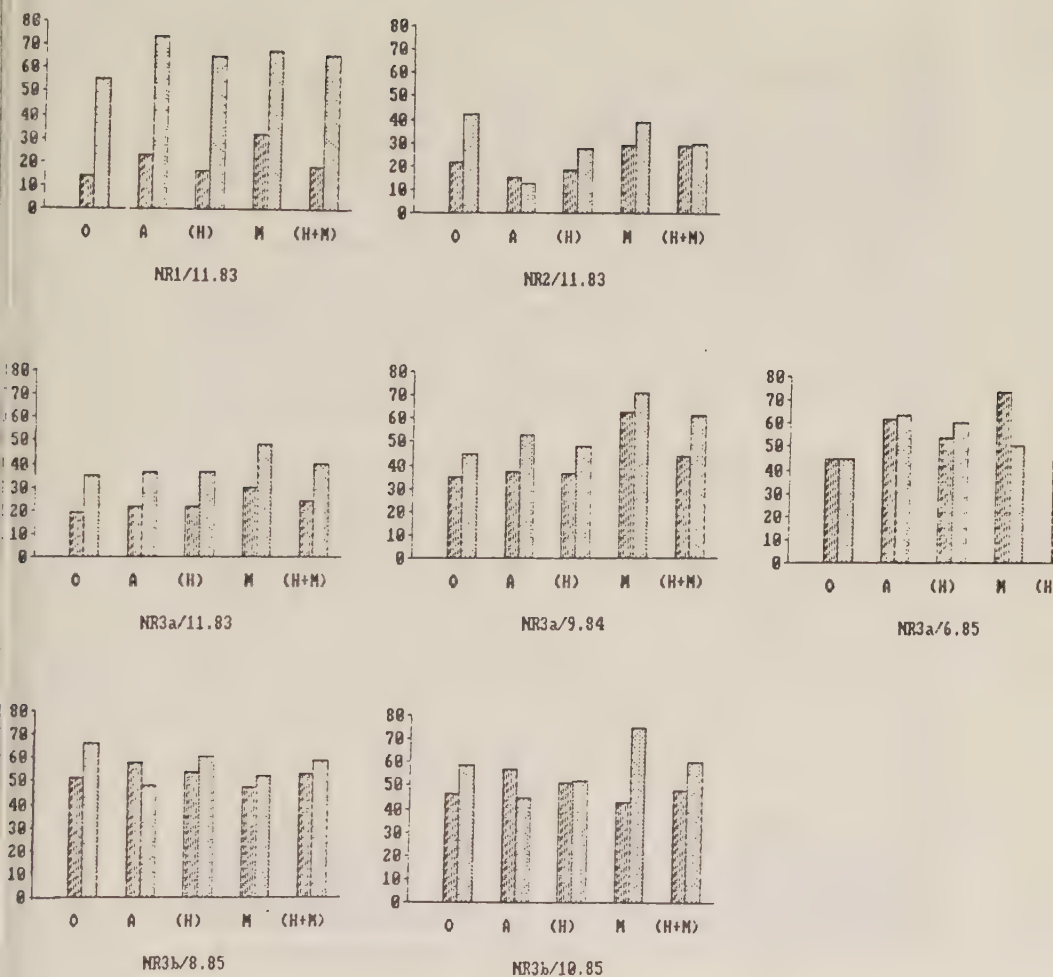


Abb. 1a: Anteil abgestorbener Feinwurzeln von gesunden (+) und geschädigten (-) Altbuchen in den Oberbodenhorizonten der Flächen Neureichenau (NR)
 O=Humusauflage, A=A-Horizont, (H)=O+A, M=humusfreier Mineralhorizont.



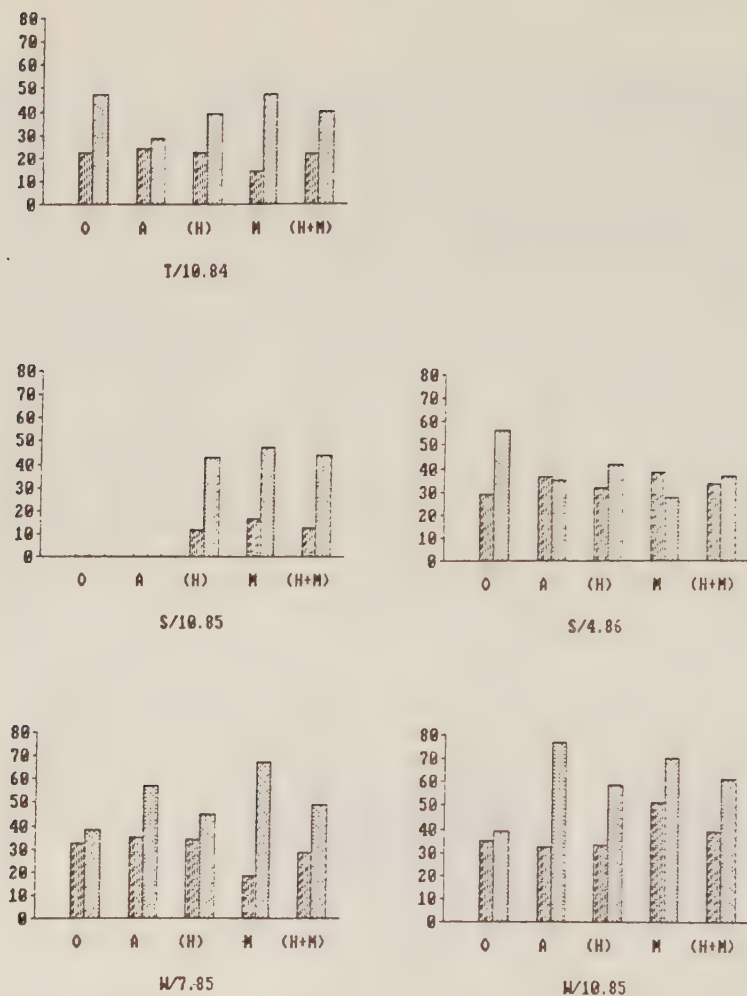


Abb. 1b: Anteil abgestorbener Feinwurzeln von gesunden (+) und geschädigten (-) Altbuchen in den Oberbodenhorizonten der Flächen Thiergarten (T), Schierling (S) und Wolfratshausen (W)
 O=Humusauflage, A=A-Horizont, (H)=O+A, M=humusfreier Mineralboden



Abweichungen zwischen der Feinwurzelgesamtmasse der gesunden und geschädigten Bäumen waren in aller Regel geringer als die entsprechenden Abweichungen der Biomasse. Dies war stets der Fall im ausgewerteten Gesamtprofil (H+M), und traf meist gleichermaßen für den humosen Oberboden (H) wie für den humusfreien Mineralboden (M) zu. In der Gesamtmasse an lebenden und abgestorbenen Feinwurzeln trat also eine Angleichung zwischen kranken und gesunden Bäumen ein, die an einzelnen Probeterminen sogar eine erhöhte Gesamtwurzelmasse bei den geschädigten Bäumen zur Folge hatte (NR 1 und W/10.85).

Es zeigte sich schließlich, daß der Anteil abgestorbener Feinwurzeln an der Wurzelgesamtmasse mit dem Schädigungsgrad der Probebäume eng korreliert war (Tab. 1a/b). Im Gesamt-Profil (H+M) und im humushaltigen Oberboden (H) - sowie in der Humusaufgabe (O) - war der Anteil abgestorbener Feinwurzeln stets höher bei den kranken Bäumen, und nur in wenigen Fällen ergaben sich in den Mineralbodenhorizonten (Ah bzw. M) höhere Werte bei den gesunden Bäumen (im humushaltigen Mineralboden in NR 3b und S/4.86, im humusfreien Mineralboden in NR 3a/6.85 und S/ 4.86).

Im Mittel aller Probeflächen und Probebäume wurden folgende Werte für die Masse des Feinwurzelsystems und den Anteil abgestorbener Feinwurzeln gesunder und geschädigter Bäume ermittelt. Die Mittelwerte beziehen sich auf das gesamte ausgewertete Profil (0-20 cm); Standortabweichungen in Klammern:

- Biomasse	(+): 240 mg/100 ml B. (+/- 100)
	(-): 170 mg/100 ml B. (+/- 70)
- Nekromasse	(+): 135 mg/100 ml B. (+/- 100)
	(-): 185 mg/100 ml B. (+/- 120)
- Gesamtmasse	(+): 375 mg/100 ml B. (+/- 180)
	(-): 355 mg/100 ml B. (+/- 180)
- Anteil abgestorbener	(+): 33 % (+/- 14)
Feinwurzeln	(-): 50 % (+/- 12)

In den einzelnen Horizonten war der Anteil toter Wurzeln im Mittel ebenfalls stets größer bei den geschädigten Bäumen (31,4/48,0 % in O; 36,4/48,1 % in A und 37,9/55,6 % im Mineralboden). Diese Unterschiede waren in O und im Mineralboden statistisch signifikant ($p = 0,5$ bzw. $0,1$).

Im T-Test ließen sich die Biomasssen (mit $p < 10$ %) sowie die Anteile abgestorbener Feinwurzeln (mit $p < 1$ %) statistisch trennen.

4.1.1.2 Verhältnis der Feinwurzelndurchmesserklassen

Die Bestimmung der Feinwurzelmasse erfolgte getrennt für die Durchmesserklassen 0-1 mm (Feinstwurzeln) und 1-2 mm (Feinwurzeln i.e.S.). Die zweite Klasse trägt zur Gesamtlänge des Feinwurzel systems nur zu einem geringen Anteil bei. Andererseits ist sie an der Gesamtmasse des Feinwurzel systems wesentlich beteiligt. Durch die vorgenommene Trennung sollte über die Massenverteilung beider Fraktionen, ausgedrückt im Verhältnis Feinstwurzeln/Feinwurzeln (FstW/FW), ein Einblick in die Verzweigungsintensität der Wurzelsysteme gewonnen werden.

Es stellte ich jedoch heraus, daß die Bestimmung dieses Merkmals durch erhebliche Unsicherheiten belastet war. Für die gleichen Probebäume ergaben sich zwischen den einzelnen Probeterminen Abweichungen bis zu ± 119 % (in W), im Mittel lagen sie bei ± 54 %. Ein Grund für diese Schwankungen liegt offensichtlich in der starken Empfindlichkeit der Wachstums- und Verzweigungsaktivität von Feinwurzeln gegenüber kleinstandortlichen Verschiedenheiten. Zum anderen ist nicht auszuschließen, daß die vorgenommene okulare Trennung der Wurzelfrak tionen keine ausreichende Zuverlässigkeit gewährleistete. Die folgende Darstellung der FstW/FW-Relation (lebende Wurzeln) bei gesunden und geschädigten Bäumen ist daher vor dem Hintergrund der geschilderten Einschränkungen zu

betrachten. Die in Tab. 7 zusammengefaßten Ergebnisse stellen Mittelwerte aus allen Probeterminen dar, getrennt nach Probebestand und Horizont (Humus- und Mineralboden).

Probebestand	NR 1	NR 2	NR 3a/b	T	S	W
Anzahl Aufnahmen	1	1	5	1	2	2
Horizont (H) +	2,3	2,1	1,6	1,7	2,5	3,7
-	2,4	1,7	2,5	1,5	1,9	1,7
M +	0,5	0,7	1,2	0,4	0,5	3,5
-	0,8	1,6	1,5	0,5	0,9	1,0

Tab. 7: Feinstwurzel/ Feinwurzel-Gewichtsverhältnis (TG) von gesunden (+) und geschädigte (-) Altbuchen
 (H) = humushaltiger Boden (=O+A)
 M = humusfreier Mineralboden

Im Mittel aller Probeflächen betrugen die FstW/FW-Werte für das Gesamtprofil (0-20 cm) bei gesunden (+) und geschädigten (-) Bäumen:

(+) 1,82 +/- 0,74

(-) 1,78 +/- 0,98

Auf allen Probeflächen war das FstW/FW-Verhältnis bei gesunden und geschädigten Bäumen im humosen Boden (H) größer als im humusfreien Mineralboden. Im Mittel sanken die Werte im Mineralboden auf die Hälfte, am stärksten war dieser Abfall auf den Flächen NR 1 und S.

Der Unterschied zwischen gesunden und geschädigten Bäumen ließ keinen einheitlichen Trend erkennen. Auf 4 Probeflächen, NR 1, NR 2, T und S war der FstW/FW-Wert der gesunden Bäume größer (oder beinahe gleich), im Mineralboden hingegen niedriger als bei geschädigten Buchen. Im Bestand NR 3a/b war der FstW/FW-Wert bei den gesunden Bäumen niedriger. In Wolfratshausen schließlich lagen die Werte der geschädigten Buchen deutlich tiefer. Auf dieser

Probefläche wurden mit 3,7/3,5 zudem die höchsten Werte gemessen. Auch im Mineralboden blieb das Feinstwurzeln-/Feinwurzeln-Verhältnis mit 3,5 (gesunde Bäume) erstaunlich hoch.

Betrachtet man die Relation Feinst- und Feinwurzeln als Maß für die Verzweigungsintensität des Feinwurzelsystems, und damit als Resultat der Neubildungs- und Absterbevorgänge der Langwurzeln, so unterscheiden sich die geschädigten Bäume in ihrem Verhalten keineswegs grundsätzlich von den gesunden: angesichts der allgemein hohen Streuung der Werte kann man allenfalls in Wolfratshausen von einem gesicherten Unterschied zwischen den Schadstufen sprechen (zumal sich dieser Unterschied über alle Horizonte hinweg und für beide Probetermine in diesem Größenverhältnis bewegte). Auf den anderen Probeflächen scheinen die geringen Unterschiede zwischen gesunden und geschädigten Bäumen die Vermutung zu bestätigen, daß sich die Altbäume in ihrer Feinwurzelproduktion nicht wesentlich voneinander unterscheiden.

4.1.1.3 Schwachwurzelmasse

Gemessen wurde die Schwachwurzelbio- und -nekromasse in 6 Probeflächen. Aus Tabelle 8 sind Wurzelbiomasse und Anteil abgestorbener Wurzeln zu entnehmen.

Aufgrund des größeren Durchmessers der Wurzeln (2-5 mm) ergaben sich in den relativ kleinen Bohrkernen hohe Streuungen für die einzelnen Horizonte. Die Ergebnisse wurden deswegen als Gesamtwert aller erfaßten Horizonte angegeben.

Die Mittelwerte für die 6 Aufnahmen lauten wie folgt:

- Biomasse	(+): 73	+/- 15 mg/100 ml Boden
	(-): 69	+/- 24 mg/100 ml Boden
- Anteil abgestorbener	(+): 18	+/- 13 %
Wurzeln	(-): 35	+/- 12 %

Probefläche		NR				S	W
		1	2	3a	3b		
Biomasse (mg/100 ml Boden)	+	94	51	67	72	83	70
	-	84	50	57	40	106	74
Anteil abgest. Wurzeln (%)	+	7	38	22	23	3	14
	-	40	35	27	43	16	48

Tab. 8: Schwachwurzelbiomasse und Anteil abgestorbener Wurzeln von gesunden (+) und geschädigten (-) Altbuchen

Der Unterschied zwischen kranken und gesunden Bäumen im Anteil abgestorbener Wurzeln war schwach signifikant ($P < 5\%$).

Auf den Probeflächen in Neureichenau besaßen die geschädigten Probestämme stets niedrigere Schwachwurzelbiomassen als die gesunden. Dieser Rückgang war meist von einer Erhöhung des Anteils abgestorbener Wurzeln begleitet.

In Schierling und Wolfratshausen dagegen war die Biomasse der geschädigten Bäume höher als die der gesunden. Der Anteil abgestorbener Schwachwurzeln lag jedoch auch hier höher bei den geschädigten Bäumen.

Allen Probeflächen gemeinsam war also ein erhöhter Anteil toter Wurzeln bei geschädigten Bäumen, der auf eine erhöhte Wurzelmortalität schließen läßt. In Neureichenau vollzog sich die Reduktion des Schwachwurzelsystems parallel zum Verfall der Feinwurzeln, denn auch in dieser Wurzelklasse waren herabgesetzte Biomassen und erhöhte Anteile toter Wurzeln bei den geschädigten Bäumen zu beobachten.

In NR 2 lag der Anteil abgestorbener Schwachwurzeln bei geschädigten Bäumen unter den Werten der gesunden (35 % gegenüber 38 %). Die Biomasse war für beide Baumgruppen fast gleich. Ferner lagen die Biomassen auf vergleichs-

weise niedrigem und die Anteile toter Wurzeln auf hohem Niveau, sowohl bei geschädigten wie bei gesunden Bäumen. Dieser hohe Schädigungsgrad wie auch die mangelnde Differenzierung zwischen den Schadklassen weisen auf starke Schäden im Wurzelsystem von Altbüchen in diesem Bestand hin, die aufgrund ihrer Kronenmerkmale als "gesund" eingestuft wurden.

In Schierling und Wolfratshausen war die erhöhte Mortalität der Schwachwurzeln bei den geschädigten Bäumen offenbar von einer verstärkten Produktion neuer Schwachwurzeln begleitet. Dies bestätigt das Ergebnis der Feinwurzeluntersuchungen, bei denen ähnlich hohe Wurzelgesamtmassen bei gesunden und geschädigten Bäumen gemessen wurden.

In allen Beständen war demnach die Erkrankung der Altbüchen von einer erhöhten Mortalität auch der verholzten Schwachwurzeln begleitet. Diese ging jedoch offensichtlich mit einer verstärkten Wurzelproduktion einher, die sich allerdings nur auf den besseren Standorten Schierling und Wolfratshausen in eine erhöhte Biomasse bei den geschädigten Bäumen niederschlug. Dieser Einfluß des Standorts drückte sich hier auch in den vergleichsweise niedrigen Anteilen abgestorbener Wurzeln aus (im Mittel 13 % gegenüber 29 % in NR).

4.1.2 Kurzwurzelmerkmale

Folgende Merkmale wurden ermittelt (siehe 3.2.3.2)

- Mykorrhizierungsgrad
- Anteil lebender Mykorrhizen
- Mykorrhizen-Gewicht
- Relative Mykorrhizen- und Kurzwurzelzahl
- Absolute Mykorrhizen- und Kurzwurzelzahl

Die Ausprägung jedes Merkmals wird bei gesunden und geschädigten Bäumen untersucht. Auf Zusammenhänge zwischen diesen Merkmalen wird hingewiesen.

4.1.2.1 Mykorrhizierungsgrad

Dieses Merkmal gibt den Prozentsatz von Kurzwurzeln an, die mit Bodenpilzen in Symbiose leben. Diese Verbindung hängt in der Hauptsache von der Fähigkeit der Wurzeln ab, die zum Pilzwachstum notwendigen Kohlenhydrate bereitzustellen; zum andern auch von der Präsenz des zur Symbiose geeigneten Pilzmyzels in der Rhizosphäre.

Probe- fläche	1	2	NR 3a			3b		T	S		W	
Termin	11.83	11.83	11.83	9.84	6.85	8.85	10.85	10.84	10.85	4.86	7.85	10.85
Horizont (H)+ -	93.9 93.0	95.7 96.5	79.3 85.4	93.5 94.2	85.5 79.8	82.8 78.4	90.9 95.9	93.8 98.0	91.0 93.1	72.1 65.8	84.7 96.0	91.6 94.6
M + -	91.1 90.8	80.0 97.2	87.5 78.2	63.6 61.4	84.9 72.8	77.6 36.4	80.1 73.1	53.1 78.6	94.1 65.2	80.4 72.6	100.0 100.0	63.4 71.0
(H+M)+ -	93.4 90.9	94.2 96.7	81.4 82.3	90.1 92.8	85.4 79.0	81.6 74.5	88.2 94.2	91.9 97.8	91.2 92.2	72.8 66.4	91.3 96.0	85.1 82.7

Tab. 9: Mykorrhizierungsgrad von gesunden (+) und geschädigten (-)
 Altbüchen in den Oberbodenhorizonten
 (H) = O+Ah(e),
 M = humusfreier Mineralhorizont

Auf den Probestflächen NR und T ging der Mykorrhizierungsgrad mit zunehmender Bodentiefe meist zurück. Auf der Probestfläche S war dagegen eine allgemeine Zunahme zu verzeichnen. In W/7.87 waren im humusfreien Mineralhorizont (M) sogar sämtliche Kurzwurzeln mykorrhiziert. Diese vertikale Abnahme verlief jedoch in etwa gleicher Weise bei gesunden und geschädigten Bäumen und ließ somit keine Verbindung zum Schädigungsgrad erkennen (Tab. 9).

Der Vergleich des Mykorrhizierungsgrads der gesunden und geschädigten Bäume im gleichen Horizont zeigte ebenfalls keine einheitliche Abhängigkeit vom Schädigungsgrad.

Lediglich in NR 3a/3b und in S wurde im humusfreien Mineralhorizont (M) ein stärkerer Rückgang bei den geschädigten Bäumen ermittelt. Dieser Rückgang war jedoch an mehreren Probeterminen von erhöhten Werten im humushaltigen Oberboden (H) begleitet.

Folgende Mittelwerte (alle Probeterminen) ergaben sich für das Gesamtprofil (H+M):

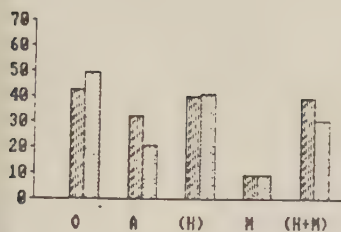
(+)	: 87,7	+/- 6 %
(-)	: 87,1	+/- 10 %, statistisch gleich

Im Gesamtprofil (H+M) lag in vielen Fällen der Mykorrhizierungsgang der gesunden und geschädigten Bäume (zwischen 80 und 90 %) eng zusammen. Eindeutig niedrigere Werte bei den geschädigten Bäumen wurden hier nur in NR 3a/6.85, NR 3b/8.85 und S/4.86 ermittelt.

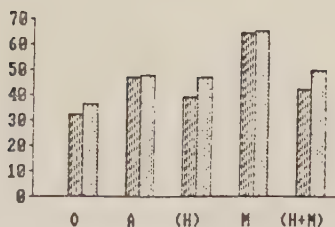
Die Erkrankung zeigte also keinen einheitlichen, alle Probeflächen betreffenden Einfluß auf den Mykorrhizierungsgang. Ein Rückgang bei den geschädigten Bäumen war nur in NR 3a/3b und S, und zwar lediglich im Mineralhorizont (M) festzustellen. Demgegenüber wiesen die geschädigten Bäume auf den anderen Probeflächen vielfach erhöhte Werte auf.

4.1.2.2 Anteil lebender Mykorrhizen und Mykorrhizengewicht

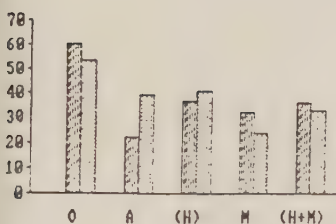
Mit der Aufnahme des Anteils lebender Mykorrhizen wird der momentane Zustand der Vitalität der Mykorrhiza beurteilt. Wesentliche Faktoren für die Lebensdauer und Mortalität der Mykorrhizen sind die Versorgung mit



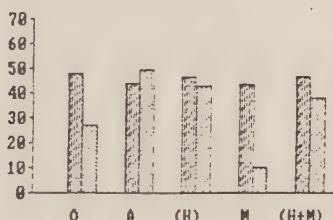
NR1/11.83



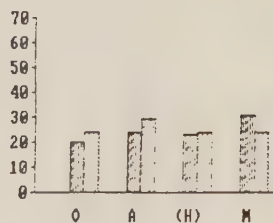
NR2/11.83



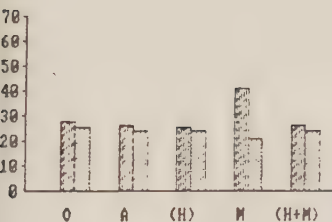
NR3a/11.83



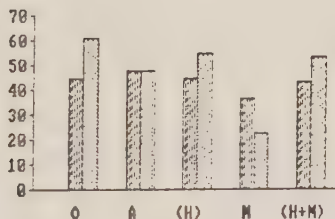
NR3a/9.84



NR3a/6.85



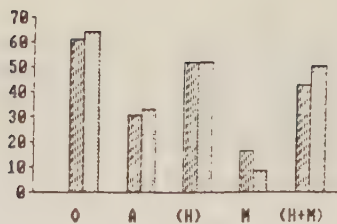
NR3b/8.85



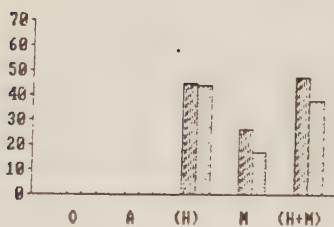
NR3b/10.85

Abb. 2a: Anteil lebender Mykorrhizen
 von gesunden (+) und geschädigten (-)
 Altbuchen in den Oberbodenhorizonten
 der Flächen Neureichenau (NR)
 O=Humusaufgabe, A=A-Horizont, (H)=O+A,
 M=humusfreier Mineralboden

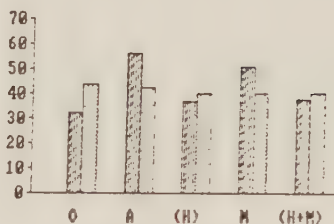




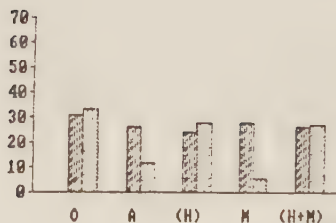
T/10.84



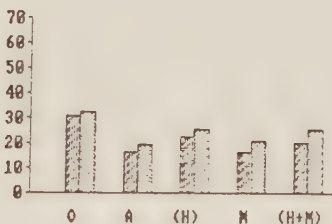
S/10.85



S/4.86



W/7.85



W/10.85

Abb. 2b: Anteil lebender Mykorrhizen
 von gesunden (+) und geschädigten (-)
 Altbuchen in den Oberbodenhorizonten
 der Flächen Thiergarten (T), Schierling (S)
 und Wolfratshausen (W)
 O=Humusauflage, A=AHorizont, (H)=O+A
 M=humusfreier Mineralboden



Assimilaten sowie vom Boden ausgehende chemische und biologische Einflüsse.

Der Anteil lebender Mykorrhiza ließ Unterschiede zwischen gesunden und geschädigten Bäumen erkennen, die jedoch sehr unterschiedlich ausgeprägt in den einzelnen Horizonten, zum Teil sogar gegenläufig, ausfielen (Abb. 2 a/b).

Für das Gesamtprofil (H+M) wurden folgende Mittelwerte aller Probebestände ermittelt:

(+)	: 36,5	+/- 10 %
(-)	: 35,3	+/- 11 %, statistisch gleich

Während die geschädigten Bäume im humosen Oberboden (H) einen höheren (oder zumindest annähernd gleichen) Anteil lebender Mykorrhiza als gesunde Bäume zeigten (zwischen 91 und 123 % des entsprechenden Werts für die gesunden Bäume), wurden umgekehrt im humusfreien Mineralboden meist niedrigere Werte bei den geschädigten Bäumen gemessen, so daß diese, im Unterschied zu den gesunden Vergleichsbäumen, stets einen ausgeprägten Tiefengradienten dieses Merkmals erkennen ließen.

Offensichtlich drückte sich die Erkrankung in einem verstärkten oder schnelleren Absterben der mykorrhizierten Kurzwurzeln aus, das jedoch weitgehend auf das humusfreie Substrat begrenzt blieb und zum Teil mit erhöhten Werten bei den geschädigten Bäumen im humushaltigen Boden verbunden war.

Zusätzlich zur Erfassung des Mykorrhizierungsgrades und des Anteils lebender Mykorrhizen wurde im Oktober 1984 auf der Fläche NR 3a eine einmalige Aufnahme des Mykorrhizen-Gewichtes durchgeführt. Bestimmt wurde das Trockengewicht von 18 Proben à 100 lebende Mykorrhizen. Die Ergebnisse lauten wie folgt:

Horizont	O		Ahe		Bv	
	+	-	+	-	+	-
Durchschnittl. Trockengewicht von 100 Myk.Spitzen (mg)	2,57	2,75	2,20	2,39	1,53	1,75
Standardabweichung (mg)	0,51	1,19	0,50	0,76	0,32	0,35

In allen Horizonten lag das Mykorrhizen-Gewicht der geschädigten Bäume etwas über dem der gesunden. Im gleichen Maß bei (+) und (-) Bäumen nahm das Gewicht mit zunehmender Bodentiefe ab. Gewichtet nach der jeweiligen Anzahl Mykorrhizen in den einzelnen Horizonten ergab sich für den Oberboden (0-20 cm) dasselbe Mittlere Gewicht für (+) und (-) Bäume (2,52 bzw. 2,58 mg TG/100 Mykorrhizen).

Zumindest für diesen Termin und für die Fläche NR 3a bildeten gesunde und geschädigte Bäume Mykorrhizen etwa gleich hohe Biomassen. Okulare Schätzungen der Form und Größe der Mykorrhizen aus den anderen Probestellen lassen vermuten, daß dieses Ergebnis generell zutrifft und die Masse der Mykorrhizen unabhängig von der Schadklasse der Bäume relativ konstant blieb.

4.1.2.3. Relative und absolute Mykorrhizenzahl

- Relative Mykorrhizenzahl

Die Relative Mykorrhizenzahl stellt das zentrale Merkmal zur Beurteilung der ernährungsphysiologischen Aktivität des vorhandenen Feinwurzelsystems dar. Sie wird von der Kurzwurzelproduktion sowie vom Zustandekommen und Erhalt der Symbiose bestimmt.

Die in Tab.10 dargestellten Ergebnisse zeigen, daß die Auswirkungen der Erkrankung auf die relative Mykorrhizenzahl in den einzelnen Probeständen unterschiedlich ausgeprägt waren.

Probefläche		NR							T	S		W	
		1	2	3a		3b							
Probetermin		11.83	11.83	11.83	9.84	6.85	8.85	10.85	10.84	10.85	4.86	7.85	10.85
Horizont													
O	+	2760	2610	4680	5440	1320	1290	1990	3890	n.b.	3180	2650	5170
	-	2590	2550	1980	870	1170	1990	5480	6670	n.b.	1120	1580	1830
A	+	440	1940	630	1360	1830	2230	2660	2170	n.b.	3350	1830	1650
	-	1100	3790	1740	1790	1520	710	2170	2770	n.b.	1890	340	1510
(H)	+	1680	2260	1430	2170	1550	1580	2200	3410	4420	3160	1970	2800
	-	1940	3290	1810	1470	1380	1320	3690	4780	3480	1730	1210	1740
M	+	110	3500	1100	910	1230	920	850	600	1090	1210	1930	1690
	-	280	3330	2570	140	560	450	480	170	60	450	110	930
(H+M)	+	800	2430	1350	1930	1380	1440	1690	2910	3680	2850	1940	2510
	-	1160	3360	1980	1300	1250	1220	3000	4130	2770	1270	1090	1650

Tab. 10: Relative Mykorrhizenzahl (Mykorrhizen/g Feinwurzel) von gesunden (+) und geschädigten (-) Altbäumen in den Oberbodenhorizonten O, Ah_(e), (H) = O + Ah_(e), M = humusfreier Mineralhorizont n.b. = nicht bestimmt

Auf den Probeflächen NR und T zeigte sich in den humushaltigen Horizonten (O und Ah(e)) keine einheitlichen Zusammenhänge dieses Merkmals mit dem Schädigungsgrad der Bäume, im Gegensatz zum humusfreien Mineralboden (M), wo meist ein deutlicher, zum Teil gravierender Rückgang der relativen Mykorrhizenzahl bei den geschädigten Bäumen stattfand. Auf den Probeflächen S und W war hingegen eine allgemeine Abnahme der relativen Mykorrhizenzahl bei den geschädigten Bäumen in allen Horizonten zu verzeichnen.

Der Rückgang bei den geschädigten Bäumen war außer in NR 1, NR 3a/11.83 und W/10.85 stets ausgeprägter im humusfreien Mineralboden (M) als im humushaltigen Boden (H).

Es war somit eine zum Teil drastische Reduzierung der relativen Mykorrhizenzahl im Verlauf der Erkrankung zu beobachten, die jedoch in Abhängigkeit von den allgemei-

nen Standortsbedingungen (Probebestände) und besonders von den horizontspezifischen Bodeneigenschaften variierte. Danach scheint ein starker und vom untersuchten Bestand weitgehend unabhängiger Rückgang der relativen Mykorrhizenzahl lediglich im humusfreien Mineralboden stattzufinden, während in den humushaltigen Horizonten eine zum Teil deutliche Zunahme bei den geschädigten Bäumen zu verzeichnen war (in NR und T).

Im Mittel aller Aufnahmen glichen sich diese Unterschiede weitgehend aus. Die Werte für das Gesamt-Profil (H+M) lauten:

(+) : 2100 +/- 800 Myk/g leb. Feinwurzeln
 (-) : 2000 +/- 1000 Myk/g leb. Feinwurzeln

Diese Werte sind statistisch nicht zu trennen.

- Absolute Mykorrhizen-Zahl

Probe- fläche	NR							T	S		W	
	1	2	3a		3b							
Termin	11.83	11.83	11.83	9.84	6.85	8.85	10.85	10.84	10.85	4.86	7.85	10.85
Horizont												
O +	670	350	660	1680	880	790	660	1400	n. b.	2660	770	3760
-	210	280	420	180	350	780	1440	1680		210	910	1100
Ah+	70	430	150	150	530	490	500	350	n. b.	1050	1550	1160
-	230	1000	240	150	250	170	500	570	n. b.	830	110	460
(H)+	390	380	300	350	660	630	560	910	1900	1680	1280	1990
-	210	550	290	160	270	430	900	1090	780	590	560	820
M +	10	210	100	40	80	110	110	60	100	140	690	280
-	20	200	180	5	40	40	30	10	40	70	5	80
(H+M)+	150	330	210	210	360	390	320	600	880	890	900	960
-	100	400	240	100	160	290	450	660	380	300	290	490

Tab.11: Absolute Mykorrhizenzahl (lebende Mykorrhizen/100 ml Boden) von gesunden (+) und geschädigten (-) Altbüchen in den Oberbodenhorizonten O, Ah(e), (H) = O+Ah(e), M = humusfreier Mineralhorizont
 n. b. = nicht bestimmt

Die Absolute Mykorrhizenzahl erlaubt ein Urteil über das Gesamtausmaß des für die Nährstoffaufnahme zuständigen Teils des Wurzelsystems. Sie wird von der Ausdehnung der Feinwurzeln und gleichzeitig von deren Mykorrhizabesatz beeinflusst.

Der Rückgang der relativen Mykorrhizenzahl, gepaart mit dem Abfall der Biomasse, war meist mit einem noch drastischeren Abfall der absoluten Mykorrhizenzahl, vor allem im humusfreien Mineralhorizont (M) der geschädigten Bäumen verbunden (Tab. 11). Im humosen Oberboden (H) wurden dagegen vielfach höhere Werte bei den geschädigten Bäumen ermittelt (in NR 2 und 3b sowie in T), so daß lediglich auf den Probeflächen S und W der Rückgang der absoluten Mykorrhizenzahl den gesamten untersuchten Profilabschnitt (H und M) erfaßte.

Im Mittel aller Aufnahmen war für das Gesamt-Profil die absolute Mykorrhizenzahl der gesunden und geschädigten Bäume gleich:

(+): 510 +/- 310 Myk/100 ml Boden

(-): 500 +/- 340 Myk/100 ml Boden

4.1.2.4 Relative und absolute Kurzwurzelzahl

Bei den Kurzwurzeluntersuchungen wurden die folgenden Fraktionen ausgewiesen:

- nicht mykorrhizierte Kurzwurzeln
- lebende Mykorrhizen
- abgestorbene Mykorrhizen

Um einen Einblick in die Gesamt-Kurzwurzelproduktion bei gesunden und geschädigten Bäumen zu erhalten, soll hier der Vergleich der Kurzwurzelzahlen, also unter Einbeziehung der nekrotischen und nicht mykorrhizierten Kurzwurzeln, dargestellt werden.

Die Unterschiede zwischen Kurzwurzelzahlen von gesunden und geschädigten Bäumen (Tab. 12) folgten meist den festgestellten Unterschieden der Mykorrhizenzahlen (Tab. 10 und 11).

Probe- fläche	NR								T	S		W	
	1	2	3a		3b								
Termin	11.83	11.83	11.83	9.84	6.85	8.85	10.85	10.84	10.85	4.86	7.85	10.85	
Horizont	Relative Kurzwurzelzahl												
(H)+ -	4270 5090	5950 7130	4190 4810	4910 4040	6770 6100	6630 5800	5080 6940	6890 9390	9700 8530	9980 5250	7970 4390	770 910	
M + -	890 2540	6000 5240	3740 12000	2730 1670	5540 2680	2690 2580	2540 2580	4200 1690	3370 4840	2670 1340	6980 2220	11140 5580	
(H+M)+ -	3720 3840	5960 6720	4060 6610	4500 3640	6130 5390	5810 5340	4180 5930	6410 8250	8330 7660	8560 3760	7529 4160	12580 7040	
	Absolute Kurzwurzelzahl												
(H)+ -	990 550	1000 1190	880 770	790 440	2890 1190	2650 1890	1290 1670	1840 2140	4170 1910	5310 1790	5170 2030	9320 3400	
M + -	80 180	360 330	340 840	120 60	360 190	320 230	330 160	420 100	310 310	310 210	2500 120	1850 480	
(H+M)+ -	700 330	810 800	630 800	490 280	1600 690	1550 1270	790 890	1320 1320	1990 1050	2670 890	3480 1110	4820 2090	

Tab.12: Relative und absolute Kurzwurzelzahl von gesunden (+) und geschädigten (-) Altbüchen in den Oberbodenhorizonten O, Ah(e), (H) = O+Ah(e), M = humusfreier Mineralhorizont

In Neureichenau wurden im Mineralboden (M), außer auf den Flächen NR 1 und 2/11.83, durchwegs höhere Werte bei den gesunden Probestämmen ermittelt. Im Humusboden (H) lag jedoch insbesondere die Absolute Kurzwurzelzahl teilweise erheblich höher bei den geschädigten Bäumen (NR 1, 3a, 3b/8.85).

In S und W wurden in beiden Horizonten (H und M) meist niedrigere Werte bei den geschädigten Bäumen gefunden.

Der Rückgang der Kurzwurzelzahlen kommt einer Senkung der Kurzwurzelgesamtproduktion bei den geschädigten Bäumen gleich. Sie war jedoch auf den Probestflächen NR und T

teilweise von einer Mehrproduktion bei den geschädigten Bäumen in den Humushorizonten begleitet.

Es fällt ferner auf, daß ein Rückgang der Kurzwurzelzahlen bei den geschädigten Bäumen, mit seltenen Ausnahmen (NR 1 und W/10.85) weniger ausgeprägt als der entsprechende Rückgang der Mykorrhizenzahlen war. Wie schon bei den Feinwurzeln ersichtlich, war die Erkrankung offensichtlich in erster Linie durch eine Erhöhung der Mortalität von (mykorrhizierten) Kurzwurzeln gekennzeichnet.

Die Mittelwerte der Kurzwurzelzahlen (alle Termine; Gesamtprofil) lauten wie folgt:

Relative Kurzwurzelzahl:

(+) : 6500 $\pm$ 2500 Kurzw./g leb. Feinwurzeln

(-) : 5700 $\pm$ 1600 Kurzw./g leb. Feinwurzeln

Absolute Kurzwurzelzahl:

(+) : 1740 $\pm$ 1330 Kurzw./100 ml Boden

(-) : 960 $\pm$ 480 Kurzw./100 ml Boden

Nur die absoluten Kurzwurzelzahlen ließen sich statistisch trennen ($p < 10\%$).

4.1.3 Feinwurzelmerkmale im Bv-Horizont der Fläche NR 3a

Eine einmalige Aufnahme von 4 Bäumen auf der Fläche NR 3a sollte Hinweise über die Entwicklung der Feinwurzelmerkmale von gesunden und geschädigten Bäumen in tieferen Schichten des Bv-Horizontes liefern. Bestimmt wurde die lebende und abgestorbene Feinwurzelmasse sowie der Mykorrhizierungsgrad in 15 und 50 cm Tiefe. Tabelle 13 gibt Auskunft über die erzielten Ergebnisse.

	Boden- Tiefe-	Feinwurzelmasse (mg TG / 100 ml Boden)		Anteil abgest. FeinW	Mykorrhhi- zierungs- grad (%)
		Biomasse	Nekromasse		
+	15	114	71	38	83,6
	50	19	19	48	83,0
-	15	74	95	56	84,5
	50	24	28	53	86,4

Tab. 13: Einfluß der Bodentiefe auf die Feinwurzelmerkmale und den Mykorrhizierungsgrad von gesunden (+) und geschädigten (-) Altbüchen

Bei gesunden und geschädigten Bäume fand ein Rückgang der Feinwurzelmasse mit zunehmender Bodentiefe statt.

Die Biomasse fiel bei den geschädigten Bäumen von 74 auf 24 mg TG/ 100 ml Boden, während bei den gesunden Bäumen ein noch stärkerer Rückgang von 114 mg/ 100 ml (15 cm) auf 19 mg/ 100 ml zu verzeichnen war.

Hier, wie allgemein auf allen Probeflächen, kam im Oberwurzelsystem eine positive Korrelation zwischen Biomasse und Erkrankung deutlich zum Ausdruck (114 mg/ 100 ml bei +, 74 mg/ 100 ml bei -). Bedingt durch den besonders drastischen Abfall bei den gesunden Bäumen war dieser Zusammenhang in 50 cm Tiefe jedoch nicht mehr abzulesen (19 mg/ 100 ml bei +, 24 mg/ 100 ml bei -).

Die gesunden Bäume besaßen im Oberwurzelsystem einen wesentlich niedrigeren Anteil abgestorbener Wurzeln als die geschädigten (38 % gegen 56 %). Dieses Ergebnis bestätigte die zuverlässige Korrelation zwischen diesem Merkmal und den Schäden an den oberirdischen Organen der Bäume. Im Tiefwurzelsystem (50 cm) hingegen lag der Anteil toter Feinwurzeln der gesunden Bäume knapp über dem der geschädigten.

Wie schon für die Biomasse trat also auch für den Anteil abgestorbener Wurzeln ein Zusammenhang mit der Intensität

der Erkrankung lediglich in den oberen Bodenhorizonten zutage. Im Tiefwurzelsystem dagegen war ein Rückgang der Biomasse und eine Zunahme des Anteils abgestorbener Wurzeln auf dem gleichen Niveau bei gesunden und geschädigten Bäumen festzustellen.

Diese Entwicklung erlaubt keine unmittelbare Antwort auf die Frage, inwiefern die Buchenerkrankung auch Auswirkungen auf das Feinwurzelsystem in tiefer gelegenen Bereichen des Mineralbodens zeigt. Die beobachteten Tiefengradienten der Feinwurzelmerkmale wurden jedoch bereits als Symptome der Erkrankung im Oberwurzelsystem ausgewiesen. Nicht auszuschließen ist daher, daß der hier dargestellte Rückgang der Dichte und der Vitalität des Tiefwurzelsystems ebenfalls pathologische Erscheinungen bei den Prohebäumen darstellen, die als "gesund" ausgewiesen wurden.

In beiden Tiefenstufen war der Mykorrhizierungsgrad etwa gleich hoch bei gesunden und geschädigten Bäumen. Schon in den Horizonten des Oberbodens konnte kein allgemein gültiger Zusammenhang zwischen diesem Merkmal und dem Gesundheitszustand der Prohebäume festgestellt werden (vgl. Abschnitt 4.1.3.1). In dieser begrenzten Untersuchung zeigte sich darüber hinaus, daß geschädigte Bäume von gesunden auch nicht anhand des Mykorrhizierungsgrades ihres Tiefenwurzelsystems zu unterscheiden waren.

Schließlich stellte sich heraus, daß der Mykorrhizierungsgrad mit zunehmender Bodentiefe innerhalb des gleichen Bodenhorizontes mit 85 % ausgesprochen konstant blieb.

4.1.4 Wurzelmerkmale auf der schadfreien Fläche NR 4

Erfaßt wurde die Feinwurzelmasse (Durchmesser <2 mm) sowie einige Mykorrhiza-Merkmale von gesunden Altbuchen

aus der äußerlich schadensfreien Fläche NR 4. Bodentyp war ein Podsol.

Die Ergebnisse hierzu sind aus Tab. 14 zu entnehmen. Zum besseren Vergleich wurden die bereits beschriebenen Ergebnisse für den geschädigten Bestand NR 3a herangezogen. Dieser Bestand stockt auf einer sauren Braunerde.

Horizont	Bestand	Schadestufe der Probe-Bäume	Feinw.masse (mg/100 ml Boden)			Anteil abgest. Fw. (%)	Kurzwurzelmerkmale		
			Biomasse	Nekrom.	Gesamt.		Myk.-Grd(%)	Anteil leb. Myk(%)	Relat. Myk. Zahl
H	NR3a(-)	+	430	490	920	54	86	23	1500
	-	-	200	290	480	60	80	24	1400
	NR4 (+)	+	90	220	300	71	84	18	800
M	NR3a(-)	+	70	180	250	74	85	31	1600
	-	-	70	100	170	56	73	24	600
	NR4 (+)	+	65	60	130	49	80	33	500
(Ges)	NR3a(-)	+	260	290	550	53	85	24	1400
	-	-	130	180	310	59	79	24	1200
	NR4 (+)	+	75	130	200	65	81	28	600

Tab. 14: Merkmale des Feinwurzelsystems von Altbuchen aus unterschiedlich geschädigten Beständen

H = Humusboden
M = Mineralboden
(Ges) = gesamtes ausgewertetes Profil
+ = "gesund"
- = "geschädigt"

Verglichen mit der Wurzelmasse der gesunden sowie der geschädigten Bäume der Fläche NR 3a wurden niedrigere Bio- und Nekromassen auf der schadensfreien, extrem bodensäuren Fläche NR 4 gemessen.

Dieser Unterschied war für die Biomasse im humushaltigen Oberboden (H) stark ausgeprägt (90 gegen 430 bzw. 200 mg/100 ml Boden), während im Mineralboden (M) beinahe gleich hohe Werte gemessen wurden (65 gegen 70 mg/100 ml Boden). Ebenfalls niedriger war die Nekromasse in NR 4. Sie betrug hier ca. die Hälfte (im H) bzw. 2/3 (in M) der Nekromasse in NR 3.

Der Anteil abgestorbener Feinwurzeln war höher im humosen Oberboden der schadensfreien Fläche (NR 4) im Vergleich sowohl zu den gesunden als auch zu den geschädigten Bäumen in NR 3a. Im Mineralboden wurde umgekehrt der niedrigste Wert in NR 4 ermittelt.

Der Mykorrhizierungsgrad sowie der Anteil lebender Mykorrhizen zeigten nur geringfügige Unterschiede im Vergleich beider Probeflächen:

Bei den gesunden Bäumen lag der Mykorrhizierungsgrad in NR 4 knapp unter dem in NR 3a (geschädigte Fläche). Dieses Ergebnis bestätigt, wie bereits im Abschnitt 4.1.2.1 festgestellt, daß der Mykorrhizierungsgrad von Standortfaktoren und vom Gesundheitszustand der Bäume wenig beeinflusst wird. Auch im nicht betroffenen Bestand NR 4 lag der Mykorrhizierungsgrad auf dem gleichen Niveau von geschädigten Beständen.

Der Anteil lebender Mykorrhizen war in NR 4 im Humus um ca. 20 % niedriger, im Mineralboden geringfügig höher als auf der Fläche NR 3 (gesunde Bäume). Bei diesem Merkmal waren also ebenfalls nur schwache Unterschiede zwischen Bäumen der gleichen Schadklasse aus unterschiedlich stark betroffenen Beständen festzustellen. Diese Aufnahme bestätigte dagegen die Abnahme des Anteils lebender Wurzeln geschädigter Bäume im Mineralboden (in NR 3a 24 % gegen 31 % bei den gesunden).

Die relative Mykorrhizenzahl hingegen unterlag einer klaren Differenzierung, die in Humus- und Mineralboden ähnlich verlief. Für die gesunden Bäume in NR 3 wurden im Vergleich zu NR 4 ca. zweifach (in H) bzw. dreifach (in M) höhere Werte ermittelt. Selbst im Vergleich zu den geschädigten Bäumen (NR 3a) besaßen die gesunden Probebäume auf NR 4 - vor allem im Humusboden - eine niedrigere Mykorrhizen-Zahl.

Da vergleichbare Mykorrhizierungsgrade und Anteile lebender Mykorrhizen gleichzeitig bei allen Probebäumen vorliegen, ist dieser Befund eher durch einen allgemeinen Rückgang des Mykorrhiza-Besatzes überhaupt (lebend und abgestorben), also der Mykorrhiza-Produktion zu erklären. Verbunden mit einer niedrigen Biomasse sind die Buchen der Fläche NR 4 durch ein hinsichtlich Masse und Effektivität unterlegenes Feinwurzelsystem gekennzeichnet.

Insgesamt konnten spürbare Veränderungen im Feinwurzelsystem durch einen Wechsel der Standortfaktoren verzeichnet werden. Die aufgrund von Kronenmerkmalen als "symptomfrei" eingestuften Altbuchen besaßen deutlich unterschiedene Feinwurzelbio- und Nekromassen sowie Mykorrhizenzahlen. Gleiche Differenzen zeigten sich in abgeschwächter Form sogar zwischen gesunden Bäumen in NR 4 und geschädigten Bäumen in NR 3a.

Der Mykorrhizierungsgrad sowie der Anteil lebender Mykorrhizen änderten sich demgegenüber wenig.

4.1.5 Untersuchung der Feinwurzelregeneration mittels der "ingrowth cores" - Methode

Zur Abschätzung der Regenerationsfähigkeit der Feinwurzelsysteme gesunder und geschädigter Bäume wurden auf den Probeflächen NR 3a und NR 3b die neu gebildete Wurzelmasse sowie die Anzahl der Mykorrhizen bestimmt. Einen Überblick über die erzielten Ergebnisse liefert Tabelle 15.

Probebestand Termin	NR 3a/ 6.85		NR 3b/ 6.86	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
Biomasse (mg leb. Feinstw. /100 ml Boden)	+	32	-	38
	-	18	-	26
Mykorrhizgs.- Grad (%)	+	78	11	77
	-	83	13	76
Relative My- korrhizenzahl	+	14200	5300	13000
	-	20900	5700	17400
				3100
				6600

Tab. 15: Feinwurzelregeneration von gesunden (+) geschädigten (-)
Altbüchen ("Ingrowth Cores" -Methode)
s = Standardabweichung

Auf beiden Flächen wurden deutlich niedrigere Biomassen bei den geschädigten Bäumen gemessen (ca. die Hälfte bzw. 2/3 der Biomasse der gesunden).

In diesem Versuch wurde die Regeneration des Wurzelsystems bezogen auf das Bodenvolumen punktuell getestet. Die Feinwurzelmasse in den Regenerationskernen steht unter anderem in enger Beziehung mit der Wurzelbiomasse, die zu Versuchsbeginn im Boden ist. Bezieht man nun die neu gebildete Wurzelmasse auf die Wurzelaustragsmasse (Biomasse, Tab.4, Abschnitt 4.1.1.1), so ergibt sich ein korrigiertes Bild von der stattfindenden Regeneration für die untersuchten Probeebäume.

Die Ergebnisse hierzu lauten wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{NR 3a} &+ 32/110 \times 100 \% = 29 \text{ mg/100 ml Boden} \\ &- 18/75 \times 100 \% = 24 \text{ mg/100 ml Boden} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{NR 3b} &+ 38/270 \times 100 \% = 14 \text{ mg/100 ml Boden} \\ &- 26/240 \times 100 \% = 11 \text{ mg/100 ml Boden} \end{aligned}$$

Daraus ist ersichtlich, daß die Regenerationsleistung der Feinwurzeln der geschädigten Bäume nur geringfügig niedriger war als diejenige der gesunden.

Diese an einem begrenzten Versuch gewonnene Erkenntnis deutet auf eine bei gesunden und geschädigten Bäumen nahezu gleichwertige Wurzelgesamtproduktion hin. Die niedrigere Biomasse im natürlich gewachsenen Wurzelsystem der geschädigten Bäume wäre folglich nur durch eine erhöhte Mortalität zu erklären.

Die Auswertung der Vermikulitkerne erfolgte bereits nach 10 Monaten. Diese enthielten überwiegend (zu ca. 95 %) lebende Wurzeln (die ausnahmslos der Durchmesser-Klasse <1 mm angehörten). Aus diesem Grund wurde auf die wenig aussagefähige Aufnahme der Nekromasse und somit auf die Beurteilung der Mortalität der neugebildeten Feinwurzeln verzichtet.

Generell wurden ähnlich hohe Mykorrhizierungsgrade bei gesunden und geschädigten Bäumen ermittelt. Die Unterschiede ließen sich im T-Test nicht absichern.

Auch die Mykorrhizierungsgrade der Probebäume waren zu Beginn des Versuchs beinahe gleich (um 95 %). Die am Ende des Versuchs ermittelten Werte (um 80 %) sprechen dafür, daß zumindest in der Regenerationsphase weder die physiologischen Eigenschaften der Wurzeln noch die Substrateigenschaften einen merklichen Einfluß auf das Zustandekommen der Symbiose ausübten.

Die relative Mykorrhizen-Zahl der geschädigten Bäume war dagegen stets größer (um 50 bzw. 30 %) als diejenige der gesunden. Nur auf NR 3a ließen sie sich jedoch statistisch voneinander trennen. Bei Versuchsbeginn wurden folgende Werte ermittelt (siehe Tab. 10):

	NR 3a	NR 3b
+	1380	1440
-	1250	1220

Die entsprechenden Werte für die jungen Wurzeln der Regenerationskerne sind für die gesunden Bäume ca. 8mal, für die geschädigten ca. 15mal größer.

Diese starken Unterschiede sind erstens dadurch zu erklären, daß sämtliche Langwurzeln der Regenerationskerne unverholzt und dicht mit Kurzwurzeln besetzt waren. Das Fehlen von wenig verzweigten Langwurzeln der Durchmesserklasse 1-2 mm war ein weiterer Grund für das Ansteigen der Relativen Mykorrhizenzahl. Schließlich befanden sich beinahe 100 % der Mykorrhizen im aktiven Zustand. Aus diesen Gründen können die jungen Wurzeln aus den Vermikulitkernen nur bedingt mit dem natürlich gewachsenen, durchschnittlich älteren Feinwurzelsystem verglichen werden.

Auffällig ist jedoch die Umkehrung der Relation zwischen gesunden und geschädigten Bäumen. Die Relative Mykorrhizenzahl der natürlich gewachsenen Wurzelsysteme lag am Versuchsanfang auf beiden Probeflächen etwas höher bei den gesunden Bäumen (ca. 1400 gegenüber 1200 leb. Myk/g leb. Feinwurzeln). Am Versuchsende, nach 12 Monaten (NR a) bzw. 10 Monaten (NR b) lagen umgekehrte Verhältnisse vor. Daher liegt der Schluß nahe, daß die im Zuge der Erkrankung teilweise festgestellte Differenzierung dieses Merkmals keineswegs in der Jugendphase der Feinwurzeln stattfand. Vielmehr scheint dieser Vorgang erst in der späteren Entwicklungsphase der Mykorrhizen einzusetzen, was mit einer frühzeitigen Alterung bzw. einem schnellen Absterben gleichbedeutend wäre.

4.2 WURZELMERKMALE VON GESUNDEN UND GESCHÄDIGTEN JUNGPFANZEN

Auf den Probeflächen Erlangen (E) und Neureichenau (NR 3) wurden insgesamt 24 bzw. 56 ein- bis zweijährige Buchen auf ihren Gesundheitszustand hin angesprochen und die wichtigsten Merkmale ihres Feinwurzelsystems sowie des Kurzwurzel- und Mykorrhizenbesatzes quantitativ bestimmt. Die Ergebnisse sind aus Tabelle 16 zu entnehmen.

	Erlangen / 9.84			Neureichenau / 8.85		
	(+) x S	(-) x S	Test- ergb.	(+) x S	(-) x S	Test- ergb.
Feinwurzel- biomasse/ Pflanze (g)	1,11 (0,60)	0,41 (0,12)	+++	0,81 (0,28)	0,54 (0,25)	+++
Wurzel/ Sproß- Verhältnis	1,31 (0,29)	1,05 (0,27)	+	1,36 (0,53)	1,01 (0,44)	+
Mykorrhhi- zierungs- grad (%)	78,5 (10,8)	84,3 (9,9)	-	85,7 (7,1)	86,3 (7,2)	-
Anteil leb. Myk. (%)	35,4 (8,5)	19,8 (5,7)	++	41,3 (13,0)	33,0 (6,9)	-
Rel.Myk.zahl (Anzahl/g leb.Feinw.)	4380 (1060)	2900 (1240)	+	2940 (1060)	2780 (780)	-

Tab.16 : Fein- und Kurzwurzelmerkmale von 1-/2-jährigen gesunden (+) und geschädigten (-) Buchen

S = Streuung

Testergebnis: + = signifikanter Unterschied ($p = 5\%$, 1% , $0,1\%$), - = nicht signifikanter Unterschied

Geschädigte Buchen wiesen eine signifikant kleinere Feinwurzelbiomasse pro Pflanze auf. Damit verbunden war ein Abfall des Wurzel/ Sproßverhältnisses, der einen überproportionalen Rückgang des Wurzelsystems, gemessen am Rückgang der oberirdischen Organe, bei den geschädigten Pflanzen anzeigt.

Diese Zusammenhänge treffen vor allem für die Probefläche Erlangen zu. Hier war die "geschädigte" Gruppe aufgrund von sichtbaren Blattschäden ausgewiesen worden. Somit scheint diese begrenzte Untersuchung einen Hinweis auf eine Parallelität zwischen dem Rückgang der Assimilationsorgane und der Feinwurzeln zu liefern.

Auf beiden Flächen bestand keine Korrelation zwischen dem allgemeinen Gesundheitszustand der Jungbuchen und dem Mykorrhizierungsgrad.

Dagegen wurden niedrigere Anteile lebender Mykorrhizen wie auch niedrigere relative Mykorrhizenzahlen bei den geschädigten Bäumen ermittelt, die jedoch nur auf der Probefläche Erlangen statistisch abzusichern waren.

Dieser Abfall betrug

- für den Anteil lebender Mykorrhizen
in E -44 %, in NR -20 %
- für die relative Mykorrhizenzahl
in E -34 %, in NR -5 %

Die sichtbare Schädigung der Assimilationsorgane in Erlangen ging also, ähnlich dem Rückgang der Feinwurzelbiomasse, mit einem starken Rückgang der lebenden Mykorrhizen einher. Gleichzeitig aber zeigten die Ergebnisse in NR, daß eine spürbare Minderung der Feinwurzelmasse nicht notwendigerweise mit einer starken, gesicherten Reduzierung der Mykorrhiza verbunden sein muß.

4.3 SUBSTRATVERSUCHE

In den Jahren 1983 bis 1986 wurden zwei Versuchsreihen mit der Testpflanze Buche angelegt, in denen das Wachstum und insbesondere die Entwicklung des Feinwurzelsystems von Jungpflanzen im Substrat aus dem Wurzelraum unterschiedlich geschädigter Altbuchen quantifiziert wurde. Außerdem wurde das Substrat aus einer nahegelegenen Lichtung getestet, die also dem von der Kronentraufe chemisch verschiedenen Freilandniederschlag ausgesetzt war.

Das Hauptaugenmerk wurde darauf gerichtet, ob Parallelen zwischen den Wurzelmerkmalen der Versuchspflanzen und den Wurzelschäden der Bäume im Bestand feststellbar waren. Damit sollten Hinweise zur Beantwortung der Frage geliefert werden, ob und welche chemischen oder biologischen Veränderungen im Bodenkörper bei diesen Schädigungen mitwirken.

Zur Charakterisierung und Beurteilung der Testpflanzen wurden die Relative Mykorrhizenzahl (lebende Mykorrhizen/g lebende Feinstwurzeln) sowie das Gesamtpflanzengewicht und das Feinstwurzelsgewicht herangezogen. Anhand des Gesamtpflanzengewichts wurden die Substrate im Hinblick auf ihr Nährstoffangebot und allgemein auf die von ihnen ausgehende Beeinflussung des Massenwachstums der Testpflanzen beurteilt. Das ebenfalls erfaßte Feinstwurzelsystem stellt die Gesamtheit aller Seitenverzweigungen dar, es enthält nicht die von den Jungbuchen gebildete kräftige Hauptwurzel. Die Feinstwurzeln zeigten in vielen Fällen eine stärker differenzierte Reaktion auf Verschiedenheiten des Bodenmilieus als die in allen Behandlungen relativ konstant bleibende Masse der Hauptwurzel. Insbesondere für die Beurteilung des zusammengesetzten Substrats (H + M) erwies sich die Darstellung der Feinstwurzelsmasse als notwendig, da die Einbeziehung der

hauptsächlich im H-Horizont wachsenden Hauptwurzel eine Verzerrung der Ergebnisse hervorrufen würde.

Zur Beschreibung der Ergebnisse wurden folgende Abkürzungen verwendet:

(+) Pflanzen = Jungbuchen, die im Substrat aus dem Wurzelraum von gesunden Bäumen erzogen wurden

(-) Pflanzen = Jungbuchen, die im Substrat aus dem Wurzelraum von geschädigten Bäumen erzogen wurden

(Fr) Pflanzen = Jungbuchen, die in einem außerhalb des Traufbereichs liegendem Substrat erzogen wurden ("Freiland")

(Gr+) Pflanzen = Jungbuchen, die im Substrat aus dem Wurzelraum von einer gesunden Altbuche aus dem Grafrather Fortspflanzengarten erzogen wurden

(H) = "Humus" (O- +A-Horizonte)

(M) = "Mineral" (B-Horizont)

(H+M) = im Container geschichtetes Substrat (10 cm "Humus" über 10 cm "Mineral")

4.3.1 "Jägerkopf"

In diesem Versuch wurden Substrate aus der Probefläche NR 3a, Bestand Jägerkopf, Bayerischer Wald, getestet. Die Auswertung erfolgte im Juli 1985 nach 14 Monaten Wuchszeit bzw. im Mai 1986 (nach 24 Monaten) für einen Teil der Behandlung (H + M).

Die Ergebnisse sind in Tabelle 17 und 18 zusammengefaßt, in denen auch die Ergebnisse der statistischen Überprüfung der Unterschiede zwischen den Behandlungen (+, - und Fr.) innerhalb eines Substrates (H, M oder H + M) enthalten sind. Die Unterschiede zwischen den Substraten ($p < 5\%$, in den Tabellen nicht enthalten) wurden auf die gleiche Weise überprüft und im Text erläutert.

a) Pflanzen- und Feinstwurzelgewicht

- (+) und (-) Substrate

Aus Tabelle 17 geht hervor, daß die Böden aus dem Wurzelraum unterschiedlich geschädigter Altbäume vergleichbare Auswirkungen auf das Pflanzen- und das Feinstwurzelgewicht hatten, sofern Humus und Mineralboden den Testpflanzen getrennt als Substrat dienten (Behandlung H und Behandlung M).

		Pflanzengewicht (mg)			Feinstwurzelgewicht (mg)			Relat. Mykorrhizenzahl (Myk/g Feinw.)		
Behandlung		x	s	Test-ergb.	x	s	Test-ergb.	x	s	Test-ergb.
Humus (H= O+Ahe)	+	580	196	a b	115	20	a	4600	3200	a
	-	661	156	b	111	44	a b	2700	2000	b
	Fr	530	130	a	91	42	b	5100	4300	a
Mineral (M= Bv)	+	884	223	a	160	59	a	8100	6500	a
	-	820	266	a	173	77	a	10000	6000	a
	Fr	795	218	a	138	58	a	18200	14300	b
Humus und Mineral	+ H				25	8	a	4500	1600	a
	M	979	213	b	93	30	A	7500	2700	A
	- H				18	8	b	3900	1800	a
	M	665	170	a	46	18	B	9100	3800	A
	Fr H				22	11	b	6300	3000	b
	M	674	189	a	74	23	C	20500	6100	B

Tab. 17: Pflanzen- und Feinstwurzelrockengewicht sowie relative Mykorrhizenzahl von Jungbuchen aus dem Substratversuch "Jägerkopf"
 + = Substrat unter gesunden Altbuchen
 - = Substrat unter geschädigten Altbuchen
 Fr = Substrat aus einer Freiland-Parzelle
 Testergebnis: Unterschiedliche Buchstaben bedeuten einen signifikanten Unterschied innerhalb eines Horizonts ($P < 5\%$)

Die Pflanzen sowie ihre Feinstwurzeln erreichten im Mineralboden eine um ca. 30 % größere Biomasse als im Humus. Im Substrat (H + M) traten dagegen für beide Merkmale

statistisch nachweisbare Unterschiede in Abhängigkeit von der Schadstufe der Probebäume auf, aus deren Wurzelraum die Substrate stammten.

Das Pflanzengewicht betrug bei den (+) Pflanzen 979 mg, bei den (-) Pflanzen 665 mg. Dies entspricht einem Mehrgewicht von knapp 50 % im (+) Substrat. Vergleicht man die drei getesteten Substrate untereinander, so kann man feststellen, daß die (+) Pflanzen ihre höchste Wachstumsleistung im zusammengesetzten Substrat (H + M) erreichten. Dagegen entwickelten sich die (-) Pflanzen in diesem Substrat langsamer als im Humus.

Das vollständige, dem natürlichen Zustand am meisten entsprechende Substrat (H + M) scheint also die besten Bedingungen für die Biomassenleistung zu bieten. Der Grund dafür könnte in Störungen der Nährstoffversorgung in den getrennten Horizonten liegen, die erst durch das Zusammenwirken beider Bestandteile des Oberbodens (H+M) aufgehoben würden. Wird diese grundsätzliche Förderwirkung durch das zusammengesetzte Substrat (H+M) unterstellt, so deutet das geringere Wachstum der (-) Pflanzen (665 mg : 979 mg) eine Überlagerung dieser Förderung durch besondere Eigenschaften des Substrats von erkrankten Altbäumen an.

Wie das Gesamtgewicht der Pflanzen ging auch das Feinstwurzelgewicht im (-) Substrat zurück: bei den (+) Pflanzen lag das Feinstwurzelgewicht mit 118 (= 25 + 93) mg um ca. 80 % höher als das der (-) Pflanzen (64 = 18 + 46 mg).

Der Vergleich mit den getrennt getesteten Humus- und Mineralsubstraten zeigt jedoch einen Rückgang der Feinstwurzelmasse im (H + M) Substrat, der sowohl die (+) als auch (-) Pflanzen betraf. Bei den (+) Pflanzen war der allgemeine Wachstumsschub mit einer Wurzelmasse verbunden, die nur geringfügig höher lag als diejenige im Humus-Substrat (getrennt getestet) und um ca. 25 % nied-

riger lag als im Mineralboden. Im (-) Substrat betrug der Rückgang gegenüber dem (H) Substrat 42 %, gegenüber dem (M) Substrat sogar 63 %.

Der für das Feinwurzelwachstum positive Einfluß des Mineralbodenhorizonts wurde also offensichtlich im zusammengesetzten Substrat überdeckt, so daß dieses Substrat (samt Mineralboden) günstigstenfalls (in +) auf das "Wachstumsniveau" des Humus herabgesetzt wurde.

Die Verteilung der Feinstwurzelmasse im (H + M) Substrat war von einem ausgeprägten Tiefengradienten gekennzeichnet. Der Mineralhorizont enthielt im (+) Substrat mehr als die doppelte Wurzelmasse als der Humushorizont. Offensichtlich fand eine regelrechte "Flucht" der Feinstwurzeln aus dem Humussubstrat statt, sobald ein für sie günstigeres Milieu "zur Auswahl" stand. Angesichts der stets höheren Feinwurzelkonzentration bei Alt- sowie Jungpflanzen im natürlichen Humus und humushaltigen Mineralboden muß dieser Vorgang mit den hier geschaffenen Versuchsbedingungen erklärt werden. Um Auswaschungen aus den durchlässigen Substraten oder Stauerscheinungen in dichteren Böden zu vermeiden, wurde die Bewässerung der Humussubstrate vermutlich zu knapp bemessen. In diesem methodischen Mangel liegt wohl der Hauptgrund für das herabgesetzte (Wurzel-)Wachstum im Humus-Substrat (H) gegenüber dem (M) Substrat.

Im zusammengesetzten Substrat (H + M) bewirkte dies eine Verlagerung des Wurzelwachstums in den Mineralboden. Damit wiederum ließe sich die Abnahme des Wurzelwachstums im Gesamtprofil (H + M) unter das Niveau im Humus (Behandlung H) erklären, insofern als nur noch die untere Profilhälfte (Mineralboden) voll für die Bewurzelung ausgenutzt wurde.

Unter Berücksichtigung des stark reduzierten Bodenvolumens, lassen die im Mineralboden gebildeten Wurzelmassen vermuten, daß die Feinstwurzelproduktion in (+) auf nor-

malem Niveau stattfand, oder daß zumindest eine viel schwächere Hemmung vorlag, als sie im (-) Substrat festzustellen war. Hier deutet der bereits erwähnte starke Rückgang (-63 % gegenüber dem M-Substrat) darauf hin, daß das Feinstwurzelwachstum in (M)/Behandlung (H + M) wesentlich schwächer war als im (M)/ getrennt getestet.

Insgesamt lassen die Resultate dieses Versuchs eine Hemmwirkung des Humus in diesem Versuch vermuten, die nicht auf den O- und A-Horizont begrenzt blieb, sondern sich in die tiefer gelegene Bodenschicht fortsetzte. Zumindest im (-) Substrat scheint dieser Vorgang eine ernstzunehmende Beeinträchtigung der Feinwurzelbildung zu bedeuten.

- Freiland- (Fr) Substrat

Das Gesamtpflanzengewicht der (Fr) Pflanzen war in allen getesteten Substraten geringer als das der (+) Pflanzen. Gegenüber den (-) Pflanzen wurden in den getrennt getesteten Substraten (H) und (M) niedrigere, im (H+M) Substrat geringfügig erhöhte Pflanzengewichte für (Fr) ermittelt. Diese Unterschiede waren nur im Substrat (H) gegenüber der (-) Pflanzen und im Substrat (H+M) gegenüber den (+) Pflanzen statistisch abzusichern (Tab. 17).

Keine spürbare Steigerung des Wachstums im (H+M) Substrat trat ein, wie sie für die (+) Pflanzen als Hinweis auf eine verbesserte Ernährungssituation beobachtet wurde.

Das Feinstwurzelgewicht entwickelte sich parallel zum Pflanzengewicht: Die (+) Pflanzen besaßen in allen Substraten (H, M, H+M), die (-) Pflanzen in den Substraten (H) und (M) eine höhere Wurzelmasse als die (Fr) Pflanzen. Signifikant waren diese Unterschiede jedoch nur im Substrat (H) gegenüber der (+) Pflanzen und im Substrat (H+M / 1985) gegenüber der (-) Pflanzen.

Hier fand ebenfalls eine starke Konzentration des Wurzelwachstums im Mineral-Horizont des (H+M) Substrats (74 mg in M gegen 22 mg in H). Setzt man jedoch diese Menge ins Verhältnis zum dafür beanspruchten Bodenvolumen, so ergibt sich für den Mineralhorizont in (H+M) eine Wurzelmasse, die in etwa derjenigen im getrennt getesteten Mineralboden entsprechen dürfte. Ähnlich der (+) Pflanzen fand offenbar für die (Fr) Pflanzen keine negative Beeinflussung des Wurzelwachstums durch das darüberliegende Humussubstrat statt, wie sie für die (-) Pflanzen vermutet wurde.

b) Relative Mykorrhizenzahl

In den drei Behandlungen Humus (H), Mineral (M) und Humus/Mineral (H+M) war die relative Mykorrhizenzahl bei den im Freiland-Substrat (Fr) erwachsenen Sämlingen stets größer als bei den Pflanzen, die im Substrat von kranken oder gesunden Altbuchen angezogen wurden. Außer im (H) Substrat gegenüber der (+) Pflanzen war dieser Unterschied stets signifikant (Tab.17).

Gleichzeitig wurden stets signifikant höhere Werte im Mineral-Substrat festgestellt als im Humussubstrat. Dies galt für die getrennt getesteten Substrate (H) und (M), sowie für die Behandlung in (H+M). Die relative Mykorrhizenzahl in den getrennt getesteten Substraten (H) und (M) und im entsprechenden Bodenmaterial der Behandlung (H+M) waren immer gleich.

Die relative Mykorrhizenzahl zeigte also in zweifacher Hinsicht eine andere Reaktion auf das Bodenmaterial als die gebildete Wurzelmasse. Wie die höheren Werte bei den (Fr) Pflanzen zum einen zeigen, bewirkten anscheinend die der Kronentraufe ausgesetzten Substrate einen Rückgang der relativen Mykorrhizenzahl. Dieser Rückgang war in

diesem Versuch gleich hoch in Substraten unter gesunden und geschädigten Altbäumen.

Zum andern wurde die Höhe der relativen Mykorrhizenzahl im Mineral-Horizont von (H+M), anders als die Wurzelmasse im (-) Substrat, in keiner Behandlung (+, - und Fr) vom darüberliegenden Humus-Horizont beeinflusst. Der Mykorrhizabesatz der Feinstwurzeln erwies sich daher als ein in den einzelnen Horizonten weitgehend konstantes Merkmal. Seine Ausprägung war offensichtlich in der Hauptsache von Bodeneigenschaften bestimmt, die zu Versuchsbeginn vorlagen. Substratveränderungen, die in der kurzen Versuchsdauer eintraten, blieben, zumindest im Rahmen dieser Versuchsanordnung, ohne erfaßbaren Einfluß.

c) Auswirkungen der Versuchsdauer

Die Behandlung (H+M) wurde zum Teil nach 14 Monaten, zum Teil erst nach 2 Vegetationsperioden (24 Monaten) ausgewertet. Im folgenden wird ein Überblick über die zeitliche Entwicklung der Versuchspflanzen nach 24 Monaten für die Substrate (+) und (-) gegeben. Pflanzen aus dem (Fr) Substrat standen dafür nicht mehr zur Verfügung. Die Ergebnisse sind aus Tabelle 18 zu entnehmen.

- Pflanzengewicht : nach 2 Vegetationsperioden blieb der Vorsprung der (+) Pflanzen erhalten. Er änderte sich geringfügig von 32 % (nach einer Vegetationsperiode) auf 26 %.

- Das Feinstwurzengewicht stieg in etwa dem gleichen Maße bei den (+) Pflanzen und (-) Pflanzen. Wie beim Pflanzengewicht war jedoch auch hier eine leichte relative Besserung bei den (-) Pflanzen festzustellen.

- Nach 2 Vegetationsperioden war die relative Mykorrhizenzahl in allen Horizonten um ca. das Dreifache gestiegen.

Pflanzengewicht (mg)				Feinstwurzel- gewicht (mg)			Relative Mykorrhizenzahl		
Behandlung	x	S	Test- ergb.	x	S	Test- ergb.	x	S	Test- ergb.
Humus + (H=O+Ahe)	1701	256	a	41	24	a	14300	7100	a
Mineral (M=Bv)				213	75	A	20900	10200	A
Humus - (H=O+Ahe)	1259	500	b	28	20	a	18500	5700	a
Mineral (M=Bv)				145	48	B	15500	5800	A

Tab. 18: Substratversuch "Jägerkopf"

Feinwurzelmerkmale von Jungbuchen nach 2 Vegetationsperioden
 Testergebnis: Unterschiedliche Buchstaben bedeuten einen si-
 gnifikanten Unterschied innerhalb eines Horizonts ($P < 5\%$)

Eine Differenzierung zwischen (+) und (-) Substraten hatte - auch im Mineralhorizont -, nach wie vor nicht stattgefunden. Hinsichtlich dieses Merkmals war kein Unterschied mehr zwischen Humus- und Mineralhorizont festzustellen. Der Grund für diese Entwicklung lag in einem Rückgang der Kurzwurzelanzahl (Anzahl aller mykorrhizierter und nicht mykorrhizierter Kurzwurzeln) im Mineralboden im Laufe der zweiten Vegetationsperiode (bei + von 43.000 auf 29.000, bei - von 37.000 auf 25.000. In Tab. 18 nicht aufgeführt).

Der Mykorrhizierungsgrad stieg in der gleichen Zeit von ca. 25 % auf 65 %, parallel in beiden Horizonten der (+) und (-) Pflanzen. Dieses im Vergleich zu Keimlingen aus Naturverjüngung recht langsame Einsetzen der Symbiose könnte seinen Grund in einer herabgesetzten Tätigkeit der Pilzmyzelien in den Versuchssubstraten haben.

Anders als die Hemmung des Feinwurzelwachstums im (-) Mineralhorizont fand der Rückgang der Kurzwurzelbildung erst nach 2 Vegetationsperioden, und zwar unabhängig von der Schadstufe statt.

4.3.2 "Glashüttenhäng"

In diesem Versuch wurden Substrate aus der Probefläche NR 2 (Glashüttenhäng, Bayerischer Wald) sowie aus Grafrath (Gr+, gesunder Baum) getestet. Er wurde im November 1983 nach 6 Monaten ausgewertet.

		Pflanzen- gewicht (mg)	Feinstwurzel- gewicht (mg)	Relative Mykorrhizen- zahl
Humus (H=O+Ahe)	+	472	78	400
	-	447	75	400
	Gr+	525	94	38200
Mineral (H=Bv)	+	534	95	800
	-	556	108	1500
	Gr+	487	91	11300
Humus + Mineral (H+M)	+	732	n. b.	n. b.
	-	723	n. b.	n. b.

Tab. 19: Pflanzen- und Feinstwurzelrockengewicht sowie relative Mykorrhizenzahl von Jungbuchen aus dem Substratversuch "Glashüttenhäng".

+ = Substrat von gesunden Altbuchen

- = Substrat von geschädigten Altbuchen

Gr+ = Substrat aus dem Forstbotanischen Garten in Grafrath (gesunder Baum)

n. b. = nicht bestimmt

Die angeführten Daten stellen Einzelwerte aus Mischproben dar. Eine statistische Absicherung der Ergebnisse war deswegen nicht möglich.

In diesem Versuch war ebenfalls kein starker Unterschied zwischen dem Gesamtgewicht der (+), (-) und (Gr+) Pflanzen in den separat getesteten Horizonten (H) und (M) festzustellen.

Anders als im Versuch "Jägerkopf" glich aber das Pflanzengewicht im Mineralboden in etwa demjenigen im Humus-Horizont.

Das Feinstwurzelgewicht lag zwischen 75 und 94 mg (H) bzw. 91 und 108 mg (M-). Ein deutlicher Unterschied in der Wirkung der Substrate schien damit nicht gegeben.

Im Substrat (H+M) betrug das Gewicht der (+) Pflanzen 732 mg und das der (-) Pflanzen 723 mg. Dieses Ergebnis bestätigt die für "Jägerkopf" bereits festgestellte Wachstumsförderung durch das Mischsubstrat.

In diesem Versuch, anders als in "Jägerkopf" (14 bzw. 24 Monate Versuchsdauer), besaßen die Sämlinge nach 6 Monaten im Humus- und Mineralboden von gesunden und geschädigten Altbüchen vergleichbare Gewichte. In "Jägerkopf" wurde ein offensichtlicher Rückgang des Wachstums im Humus-Substrat erst nach ca. einem halben Jahr offensichtlich (durch wiederholte Probenahmen nachgeprüft). Das undifferenzierte Wachstum in "Glashüttenhäng" scheint daher die Folge einer zu kurzen Versuchsdauer zu sein.

Die relative Mykorrhizenzahl lag bei den (+) und (-) Pflanzen sehr niedrig zwischen 400 und 1500 (Mykorrhizen/g Feinstwurzeln). Dies lag am niedrigen Mykorrhizierungsgrad, der bei diesen Behandlungen nur ca. 5 % betrug.

In den Substraten aus Grafrath (Gr +) betrug dagegen die Mykorrhizen-Zahl 38.200 Myk/g (H) bzw. 11.300 Myk/g (M). Dieser starke Vorsprung ist auf den viel höheren Kurzwurzelbesatz der Feinwurzeln (relative Kurzwurzel-Zahl) und auf den Mykorrhizierungsgrad in dieser Behandlung zurückzuführen. Die Kurzwurzelzahl war mit 94 (H) bzw. 55 (M) Kurzwurzeln/mg bereits nach 6 Monaten um ein Vielfaches höher als die der (+) und (-) Pflanzen aus der Probefläche "Glashüttenhäng" (zwischen 8 und 16). Die Mykorrhizierung war mit 41 % im Humus und 20 % im Mine-

ralboden bereits nach 6 Monaten - zumindest im Mineralhorizont - sogar erfolgreicher verlaufen als nach 14 Monaten in allen Substraten des Versuchs "Jägerkopf".

Nur im Substrat Grafrath war die Feinstwurzelmasse im Humus- und Mineralboden gleich hoch. In den Substraten (+) und (-) wurden im Humus stets niedrigere Wurzelmassen ermittelt.

Die relative Mykorrhizenzahl war ebenfalls außer in Grafrath in allen Substraten beider Versuche im Humus stets niedriger als im Mineralboden (oder höchstens gleich hoch in beiden Horizonten).

Ein Rückgang des Wachstums im Mineralboden (H+M) der geschädigten Bäume war nur durch den Einfluß der darüberliegenden Humusboden zu deuten. Für das Grafrather Substrat galten die gleichen methodischen Mängel, die auch bei den anderen Substraten zu reduziertem Wachstum im Humusboden führten. Das Feinwurzelwachstum und die Mykorrhizabildung fanden in diesem Substrat trotzdem vergleichsweise verstärkt im Humus statt. Diese Verlagerung entspricht den vielfach beschriebenen günstigen Eigenschaften dieses Horizonts für das Wurzelwachstum. Umgekehrt unterstützt es die Vermutung, daß von den Humushorizonten aller getesteten Substrate aus dem Bayerischen Wald eine Hemmwirkung auf die Wurzelentwicklung ausging.

4.4 CHEMISCHE BODENANALYSEN

Durch die Charakterisierung des Nährstoffhaushalts einiger Probeflächen wurde der Frage nachgegangen, ob Bodenmerkmale mit der Erkrankung der Buche im Zusammenhang stehen.

Neben dem Boden-pH wurden die Gehalte an Kalium, Calcium, Magnesium, Mangan und Aluminium im Stammabflußbereich von gesunden und geschädigten Altbuchen bestimmt (Tab. 20).

Probe- fläche	Hori- zont		pH (CaCl ₂)	K	Ca	Mg	Mn	Al	KAK _{eff}	V %
NR 3b	H	+	3,2	0,4	0,5	0,5	0,1	6,9	12,0	12
		-	3,3	0,4	0,4	0,4	0,1	7,6	12,1	10
	M	+	3,9	0,1	0,1	0,2	0,1	6,4	8,7	5
		-	3,9	0,1	0,2	0,2	0,1	5,8	8,4	6
NR 3a	H+M	-	3,1/3,9	0,3	0,9	0,4	0,1	9,9	14,7	11
		Fr	3,1/3,7	0,2	0,7	0,4	0,1	7,4	12,1	11
NR 4	H+M	+	2,8/3,1	0,2	1,5	0,3	0,1	2,9	8,6	23
		Fr	2,7/2,9	0,2	1,1	0,2	<0,1	2,4	7,4	21
H	H	+	4,1	0,2	16,9	3,1	0,1	0,7	22,0	92
		-	6,1	0,1	34,1	4,7	0,2	<0,1	39,1	100
	M	+	4,7	0,1	8,7	2,3	0,1	0,6	11,9	93
		-	6,4	0,1	23,8	2,8	<0,1	<0,1	26,7	100

Tab. 20: Elementengehalte (mmol IÄ/100 g Boden) im Boden von
 Buchenaltbeständen
 + = gesunde Bäume
 - = geschädigte Bäume
 Fr = Freilandfläche
 H ("Humus") = O + A
 M = Mineralboden

Die Werte stellen die Summen der beim jeweiligen pH-Wert pflanzenverfügbaren sowie der gelösten Kationenmengen dar. Die Analysen erfolgten getrennt für den "Humus" (H=Auflage + Ah) und den "Mineralboden" (M=Bv/Bt). Zur Errechnung der gesamten Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) wurden ebenfalls die Natrium-, Eisen- und Protonengehalte bestimmt (in der Tabelle nicht gesondert aufgeführt). Aus den Kationenkonzentrationen wurden schließlich die Basensättigung (V % = Anteil basischer Ionen - K, Ca, Mg, Na - an der KAK) errechnet.

4.4.1 Neureichenau

Wegen der Unterschiede in den Probeterminen und in den untersuchten Bodenhorizonten wurden die Ergebnisse für NR 3b und NR 3a/NR 4 getrennt dargestellt:

In NR 3b wurden alle Kennwerte für (H) und (M) gemessen. Probetermin war 10.85.

In NR 3a und NR 4 erfolgten gemeinsame Messungen für (H+M). Probetermin war 5.84. Diese Flächen dienten überdies als Vergleich zwischen einem geschädigten (NR 3a) und einem äußerlich symptomfreien Bestand (NR 4). Auf diesen Flächen wurden ebenfalls Freilandflächen (Fr) untersucht.

- NR 3b

Die aus saurem Gneis-Untergrund entstandenen Braunerden aus dem Wurzelraum unter den gesunden und geschädigten Bäumen unterschieden sich hinsichtlich ihrer Nährstoffausstattung nicht. Die Kationenaustauschkapazität lag bei 12 mmol IÄ/ 100 g Boden in der Auflage (O) bzw. bei 8,5 mmol IÄ/ 100 g Boden im Mineralboden (Ahe + Bv). Der tiefe pH-Wert der stark versauerten Humusauflage (pH 3,2/ 3,3) war mit einer geringen Basensättigung um 10 % bzw. 5 % verbunden. Dies beruhte auf relativ hohen Gehalten an freiem Aluminium (Zwischen 5,8 und 7,6 mmol IÄ /100g B.) und niedrigen Konzentrationen an basischen Ionen. Vor allem die Calcium-Gehalte waren extrem niedrig. Im Mineralboden betrugen sie 0,1 bzw. 0,2 mmol IÄ /100 ml B. und stiegen in der Humusauflage nur geringfügig auf 0,5 bzw. 0,4 mmol IÄ / 100 ml B.

- NR 3a und NR 4

Im Unterschied zu NR 3b wurden in NR 3a und NR 4 die Analysen (außer pH-Wert) an einem Gemisch aller Horizonte

des Oberbodens (bis -20 cm) durchgeführt. Wegen der nur geringfügigen Unterschiede zwischen Humusauflage und Mineralboden auf der benachbarten Probefläche NR 3b erscheint ein direkter Vergleich mit dieser Fläche zulässig. Aufgrund der Verwandtschaft dieser stark versauerten Böden ist darüber hinaus eine ähnliche, gleichmäßige Verteilung der Elementgehalte auch in NR 4 (Podsol) anzunehmen.

Die Kennwerte auf der Probefläche NR 3a entsprachen in allen Punkten denjenigen der Fläche NR 3b. Die Böden aus dem Stammabflußbereich (-) und aus der Freilandfläche (Fr) besaßen ähnlich niedrige Nährstoff- und Al-Gehalte sowie pH-Werte.

Die Podsole der schadfreien Fläche NR 4 ließen dagegen einen Abfall des pH-Wertes und der Kationenaustauschkapazität erkennen.

Bemerkenswert war der gegenüber der Braunerden in NR 3a/b auf ca. das Doppelte erhöhte Basenanteil (V %). Er betrug in diesem Bestand 23 / 21 %, gegenüber 11 % in NR 3a. Dies war erstens auf die leicht erhöhten Ca-Gehalte, die jedoch auch hier sehr niedrig blieben, sowie auf die relativ niedrigen Aluminium-Gehalte zurückzuführen. Sie betrugen in NR 4 etwa ein Drittel der Werte in NR 3a (2,9/ 2,4 gegenüber 9,9 / 7,4 mmol IÄ/100 ml B.)

Ein deutlicher Unterschied zwischen den Testsubstraten (-) und (Fr) war auch nicht zu verzeichnen. Vermutlich bedingt durch eine weniger mächtige Humusdecke wurde jedoch eine leicht herabgesetzte KAK auf der Freilandfläche (Fr) ermittelt.

Alle untersuchten Böden in Neureichenau waren von einem hohen Säuregrad und einer niedrigen Belegung der Austausch mit Basen, gekennzeichnet. Im geschädigten Bestand NR 3 (a/b) waren offensichtlich weder der Gesundheitszustand der Probebäume noch die Lage im Bestand (Fr-Fläche)

mit einer merklichen Differenzierung der Substrate verbunden.

Der äußerlich schadfreie Bestand NR 4 stockte auf einem extrem sauren Podsol. Entgegen dem üblicherweise zu beobachtenden Gefälle in der Elementausstattung besaß dieser Boden jedoch einen leicht höheren Calcium- und einen geringeren Al-Gehalt als NR 3 (Saure Braunerden). NR 4 war anders exponiert (SW-Hang) als der Bestand NR 3 (O-Hang). Er gehörte ferner einer niedrigeren Altersklasse an, so daß eine direkter Vergleich beider Probeflächen hinsichtlich ihres Schädigungsgrads nur bedingt zulässig ist. Eine Verbindung zwischen der Schadstufe bzw. dem Einfluß des Traufniederschlags einerseits, und den Bodeneigenschaften andererseits war jedoch in dieser begrenzten Untersuchung nur im Vergleich unterschiedlicher Bestände festzustellen. Unterschiede zeigten sich vor allem in den Nährstoff- und Aluminium-Gehalten des Bodens. Zwischen dem in allen Probeflächen ohnehin sehr tiefen Boden-pH und der Schadstufe bestand dagegen keine Korrelation. Innerhalb des gleichen Bestands dagegen schienen die genannten Faktoren in keiner Weise in Beziehung zu stehen.

4.4.2 Wolfratshausen

Die Pseudogley-Parabraunerden der Fläche Wolfratshausen (W) waren vor allem durch eine hohe Basensättigung gekennzeichnet. Diese lag für den gesunden Baum über 90 % (ca. 75 % Ca-Sättigung), bei dem geschädigten Baum sogar nahe 100 % (ca. 90 % Ca-Sättigung).

Die höhere Basensättigung im Substrat des geschädigten Baumes ging mit einer erhöhten Kationenaustauschkapazität und einem höheren Boden-pH einher. Der Grund dafür liegt vermutlich in der viel dickeren Humusauflage im Bereich

des geschädigten Baumes (ca 6 cm gegenüber 2 cm für den gesunden). Die dadurch zu erwartende erhöhte Basenzufuhr aus der Streu könnte den für diesen Bodentyp hohen pH-Wert erklären.

Damit verbunden war ebenfalls der leichte Anstieg der Al-Verfügbarkeit im (+) Substrat. Der (-) Boden war praktisch aluminiumfrei. In beiden Substraten waren die Mangan-Gehalte recht niedrig (0,1 mmol IÄ/100 g B). Nur im Humusboden der geschädigten Bäume stieg dieser gemeinsam mit dem Calcium-Gehalt auf 0,2 mmol IÄ/100 mg B. leicht an.

Wenn auch der Mineralhorizont der (+) Bäume eine relativ geringe KAK aufwies, so sind beide Substrate hinsichtlich des Nährstoffangebots als günstig zu beurteilen. Al-Toxizität kann überdies ausgeschlossen werden.

Unterstellt man eine hohe Basen- (Calcium-)Sättigung bei einem pH im "Neutralbereich" als Standortvorteil für die Baumart Buche, so lag für diese zwei Probeebäume in Wolfratshausen eine negative Korrelation zwischen ihrem Schädigungsgrad und dem Nährstoffhaushalt sowie der Azidität des Bodens vor.

4.4.3 Schierling

In Schierling wurden der pH-Wert (CaCl_2) von humushaltigem Boden H (= O + Ahe) und Mineralboden M (= Al), jeweils vom Substrat unter den gesunden (+) und geschädigten (-) Bäumen bestimmt.

Die Ergebnisse lauten wie folgt:

+ H : 4,3	- H 4,6
M : 3,9	M : 3,8

Diese Werte lassen keine Korrelation zwischen der Erkrankung und der Azidität des Bodens erkennen.

4.5 CHEMISCHE WURZELANALYSEN

Diese Untersuchung sollte Auskunft geben, ob Unterschiede im Elementgehalt der lebenden Feinwurzeln (Durchmesser <2 mm) von gesunden und geschädigten Altbäumen bestanden. Die Darstellung der Ergebnisse geschieht vor dem Hintergrund des Nährstoffangebots des Bodens als mitbestimmender Faktor der Nährstoffaufnahme. Es wird versucht, aufgrund dieser Daten erste Hinweise über die ernährungsphysiologische Tätigkeit, die Effizienz und die Vitalität des Feinwurzelsystems der Prohebäume zu gewinnen.

Die Ergebnisse sind aus Tabelle 21 zu entnehmen.

Probe- fläche		N	P	S	K	Ca	Mg	Mn	Al	Ca/Al
NR 3b	+	10,2	0,81	0,78	0,97	4,6	0,80	0,13	5,6	0,55
	-	10,1	0,80	0,88	1,02	2,7	0,76	0,14	4,4	0,42
NR 3a	-	n.b.	0,92	n.b.	1,14	7,9	1,11	0,67	9,0	0,59
NR 4	+	n.b.	0,93	n.b.	1,44	9,1	1,08	0,64	5,5	1,10
W	+	8,1	0,63	0,76	1,77	7,9	1,08	0,11	2,4	2,22
	-	9,2	0,80	0,73	3,42	12,0	1,64	0,16	3,7	2,16
S	+	n.b.	1,28	n.b.	3,84	9,6	1,81	0,57	4,4	1,48
	-	n.b.	1,12	n.b.	4,12	8,6	1,75	0,52	6,6	0,88

Tab. 21: Elementengehalte (mg/g TS) und Ca/Al-Verhältnis (Mol/Mol) in Feinwurzeln von gesunden (+) und geschädigten (-) Altbüchen

- Stickstoff, Phosphor und Schwefel

Die Konzentrationen in den Wurzeln waren für Stickstoff und Schwefel etwa gleich bei gesunden und geschädigten Bäumen. Vergleichswerte des Bodens standen nicht zur Verfügung. Zumindest für diese 2 Elemente scheint also eine intakte Aufnahme- und Einlagerungsfähigkeit der lebenden Feinwurzeln unabhängig vom Angebot aus dem Substrat und der Schadklasse der Prohebäume vorzuliegen.

Die Phosphorinhalte schwankten in Abhängigkeit vom Substrat stärker. Sie ließen jedoch keine einheitliche Verbindung zum Bodentyp erkennen. Es kam ebenfalls kein eindeutiger Einfluß der Schadklasse zum Ausdruck. In Wolfratshausen lag der Phosphorspiegel - ähnlich dem Stickstoff - niedriger in den Wurzeln des gesunden, auf einem sauren Substrat stockenden Baumes.

- Kalium

Die Kaliumgehalte waren in NR 3b und S etwa gleich bei gesunden und geschädigten Prohebäumen. Sie entsprachen dem ebenfalls gleichen Angebot aus dem Boden.

Die Wurzeln der (gesunden) Bäume in NR 4 enthielten eine circa 25 % höhere K-Menge als gesunde und geschädigte Bäume in NR 3a/b. Die Bodengehalte waren vergleichbar. In Wolfratshausen (W) wurden deutlich erhöhte Kalium-Gehalte in den Feinwurzeln des geschädigten Baumes gemessen. Auch hier lagen ähnlich hohe Kalium-Gehalte im Substrat beider Prohebäume vor.

In Neureichenau enthielten die Feinwurzeln gesunder Bäume unterschiedliche K-Gehalte, und in Wolfratshausen bestand eine negative Korrelation zwischen dem Kalium-Gehalt und der Schadstufe der Prohebäume. In beiden Fällen schien die Kalium-Aufnahme und -Retention unabhängig vom Gesundheitszustand stattzufinden. Auch zum Boden-pH und zur KAK bestand keine Korrelation, vielmehr stiegen die Kalium-Gehalte proportional zur Basensättigung des Bodens und zum Ca/Al-Verhältnis der Wurzeln. Es ist ebenfalls nicht auszuschließen, daß die lebenden Feinwurzeln äußerlich gesunder Bäume auf der (geschädigten) Fläche NR 3b, zumindest hinsichtlich der physiologischen Vorgänge der Aufnahme und Retention des leicht extrahierbaren Kaliums ebenfalls schon Störungen aufwiesen.

- Calcium

Die Calcium-Gehalte in den Wurzeln waren weitgehend durch das Angebot aus dem Boden bestimmt.

In NR 3a und NR 4, wo den geschädigten und gesunden Buchen unterschiedliche Calcium-Mengen zur Verfügung standen, erfolgte ein gleichgerichtetes Gefälle in den Spiegelwerten der Wurzeln (NR 3a: 7,9 mg/g; NR 4: 9,1 mg/g). Auf der Probefläche Schierling wichen die Gehalte in den Wurzeln nur wenig voneinander ab. In Wolfatshausen schließlich, wo der Boden des geschädigten Baums mehr als doppelt so viel Calcium enthielt als der des gesunden, war auch eine entsprechende Verschiebung der Gehalte in den Feinwurzeln zu beobachten.

In NR 3b wurden dagegen deutlich geringere Ca-Gehalte in den Wurzeln der geschädigten Bäume gemessen. Die Substrate beider Baumgruppen (+ und -) enthielten jedoch ähnlich hohe Mengen von diesem Element.

Der Rückgang der Calcium-Gehalte in den Wurzeln der geschädigten Bäumen könnte eine Folge der extrem niedrigen Ca-Sättigung dieses Standorts, vor allem im Mineralboden, darstellen. Dies könnte bedeuten, daß die lebenden Feinwurzeln äußerlich geschädigter Buchen erst unterhalb eines Mindestangebots eine im Vergleich zu gesunden Bäumen reduzierte Aufnahme bzw. Retention ausüben. Eine Trennung zwischen gesunden und geschädigten Buchen anhand des Calcium-Gehaltes ihrer Feinwurzeln träte demnach nur auf extrem verarmten Standorten ein. Für diese Annahme sprechen die relativ niedrigen Spiegelwerte, die auch bei gesunden Bäumen gemessen wurden (4,6 mg/g TS). Das Basen/Säure-Verhältnis, dargestellt anhand des Ca/Al-Werts, war auf dieser Probefläche sowohl im (Mineral-) Boden als auch in den Feinwurzeln der Probebäume von allen Beständen am niedrigsten. Dies traf besonders für die Wurzeln der geschädigten Bäume ($\text{Ca/Al} = 0,42$) zu.

Der Vergleich NR 3a/ NR 4 mit W(+) zeigt schließlich, daß die Feinwurzeln, trotz erheblich unterschiedlicher Ca-Sättigungen und -Gehalte im Boden (bis zum 25-fachen in W), ähnlich hohe Gehalte (zwischen 7,9 und 9,1 mg/g TS) aufwiesen. Die Calcium-Aufnahme lebender Wurzeln von gesunden und geschädigten Bäumen schien also unterhalb einer bestimmten Angebotsgrenze konstant zu bleiben. Nur ein "Überangebot" (W. 34,1/23,8 mmol IÄ/100 mg Boden) schlug sich in einer verstärkten Aufnahme nieder (12,0 mg/g TS), die in dieser Untersuchung (in Wolfratshausen) einen geschädigten Baum betraf.

- Magnesium

Zwischen den Magnesium-Gehalten in den Wurzeln und dem äußerlichen Schädigungsgrad der Probebäume bestand keine offensichtliche Verbindung. Die Spiegelwerte in den Wurzeln der gesunden und geschädigten Bäume in NR und S waren nahezu gleich.

In Wolfratshausen war der erhöhte Mg-Gehalt in den Feinwurzeln des geschädigten Baumes offensichtlich auf den hohen Mg-Gehalt im Boden zurückzuführen. Andererseits verfügte der gesunde Baum auf dieser Fläche ebenfalls über ein hohes Mg-Angebot, was sich jedoch keineswegs in erhöhten Spiegelwerten niederschlug. Ähnlich der Calcium-Aufnahme schien eine erhöhte Mg-Aunahme erst bei einem überhöhten Angebot einzusetzen.

- Mangan

Auf allen Probeflächen wurden ähnlich hohe Mangan-Gehalte in den Feinwurzeln gesunder und geschädigter Buchen ermittelt.

Im Unterschied zu den Elementen Magnesium und Calcium enthielten die einzelnen Böden überall vergleichbare, relativ niedrige Mangan-Gehalte (um 0,1 mmol IÄ/100 ml

Boden). Der Gehalt in den Wurzeln verschiedener Bestände war jedoch von außerordentlich hohen Schwankungen gekennzeichnet. In NR 3a, NR 4 und S lag der Mn-Gehalt mit ca. 0,6 mg/g drei- bis sechsmal so hoch wie in NR 3b und W. Die höheren pH-Werte und Calcium-Sättigungen der Substrate in W und die damit verbundene herabgesetzte Verfügbarkeit des Mangans dürften die niedrigen Gehalte der Feinwurzeln in diesem Bestand erklären. Dagegen könnten die niedrigen Gehalte der Buchenwurzeln in den sauren Braunerden in NR 3b die Folge einer reduzierten Aufnahme darstellen. Nach MURACH (1984) fällt der Mangangehalt in toten Fichtenwurzeln gegenüber lebenden am stärksten. Deswegen könnten die hier gemessenen niedrigen Gehalte als Folge eines erhöhten Austausches dieses Elements aus geschädigten lebenden Wurzeln, die aber als "lebend" angesprochen wurden, gedeutet werden. Dies wiederum würde auf eine reduzierte Vitalität des Feinwurzelsystems der geschädigten wie der gesunden Bäume in diesem Bestand hinweisen.

- Aluminium

Mit Ausnahme von NR 3b wurden höhere Aluminium-Gehalte in den Feinwurzeln geschädigter Bäume gemessen. Das Ca/Al-Verhältnis zeigte eine gute Korrelation zur Basensättigung (bzw. Ca/Al-Verhältnis des Bodens) sowie zur Schadstufe der Probestämme.

In NR 3a/b wurden sehr niedrige Ca/Al-Verhältnisse im Boden (zwischen 0,01 und 0,06) festgestellt, die sich in den Wurzeln wiederfanden (um 0,5). Im extrem sauren, symptomfreien Bestand NR 4 stieg dagegen das Ca/Al-Verhältnis der Wurzeln auf 1,1, im Boden auf 0,35. In W waren die Werte beinahe gleich. Auch in diesem Bestand enthielten die Wurzeln des gesunden Baums weniger Al, obwohl höhere Spiegelwerte im Boden, wenn auch auf sehr niedrigem Niveau, gemessen wurden.

4.6 WURZELPATHOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

An insgesamt 180 Feinwurzelabschnitten von gesunden und geschädigten Altbäumen wurden Pilzisolierungen durchgeführt. Die Wurzeln aus dem humosen Oberboden und dem humusfreien Mineralboden wurden getrennt getestet.

Tabelle 22 gibt die Anzahl der Isolierungen (absolut und relativ zur Anzahl getesteter Wurzeln) wider. Die sich ergebenden Abweichungen zwischen Humus- und Mineralboden werden im Text erläutert.

	Altbäume			
	+		-	
	n	%	n	%
Anzahl getesteter Wurzeln	60	-	120	-
<u>Cylindrocarpon destructans</u>	5	8	14	12
<u>Mortierella spec.</u>	7	12	14	12
<u>Mycelium radicis atrovirens</u>	11	18	20	17
<u>Trichoderma viride</u>	0	0	3	3
<u>Trichoderma spec.</u>	9	15	11	9

Tab. 22: Anzahl und Frequenz isolierter Pilze aus Feinwurzeln von gesunden (+) und geschädigten (-) Altbäumen

Mit Sicherheit identifiziert wurden folgende Pilzarten bzw. Gattungen:

- Cylindrocarpon destructans (Zinssm.) Scholten
(=C. radicicola Wollenw., teliomorph = Nectria radicicola Gerlach und Nilsson)
- Mortierella spec. Coemans
- Mycelium radicis atrovirens Melin

- Trichoderma viride Pers. ex Gray
- Trichoderma spec. Pers. ex Fr.

Mit Ausnahme von Trichoderma viride konnten diese Arten bei gesunden und geschädigten Bäumen isoliert werden. In beiden Gruppen dominierte Mycelium radicis atrovirens mit 18 bzw. 17 % erfolgreicher Isolierungen. Diese Art war stets dominant im Mineralboden. Von 31 Isolierungen erfolgten 26 aus Wurzeln, die aus diesem Horizont stammten.

Trichoderma-Arten wurden aus 15 % (bei +) bzw. 12 % der Feinwurzeln (bei -) isoliert. Trichoderma viride kam allerdings nur in Wurzeln geschädigter Bäume vor. Diese Arten wurden häufiger im humushaltigen Boden angetroffen (15 von 23 Isolierungen).

In ähnlichem Ausmaß (8 bis 12 % erfolgreicher Isolierungen) konnten Mortierella-Arten und Cylindrocarpon destructans isoliert werden. C. destructans wurde etwas häufiger in den Feinwurzeln geschädigter Bäume gefunden (12 % gegen 8 %). Diese Art war bei beiden Baumgruppen gleich stark im Humus- und Mineralboden vertreten (11 bzw. 8 von 19 Isolierungen).

Aus insgesamt 94 von 180 getesteten Feinwurzeln konnten pilzliche Endophyten isoliert werden. Die Gesamterfolgsquote war nahezu gleich bei gesunden (53 %) und geschädigten Bäumen (51 %). Keine Pilzart oder -gattung ließ eine offenkundige Verbindung zwischen der Besiedlungshäufigkeit und der Schadstufe der Wirtspflanze erkennen.

Als Parasiten kommen C. destructans, M. radicis atrovirens und T. viride am ehesten in Betracht. Zieht man diese drei Arten zusammen, so ergeben sich für die gesunden Bäume 16 erfolgreiche Isolierungen von 60 getesteten Wurzeln (27 %), für die geschädigten 37 von 120 (31 %). Dieser schwache Unterschied scheint keinen

gesicherten Rückschluß auf eine erhöhte Disposition der Wurzeln geschädigter Bäume gegenüber diesen Pilzen zuzulassen.

5. DISKUSSION

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, herauszufinden, ob die für das Waldsterben kennzeichnenden Kronenschäden an Buchen mit Schädigungen der Feinwurzeln verbunden sind. Zu diesem Zweck wurden Kenngrößen des Feinwurzelsystems von äußerlich symptomfreien und von geschädigten Altbuchen bestimmt. Darüber hinaus sollten Substratversuche mit Sämlingen, chemische Analysen und Isolationsversuche Hinweise über die Ursachen von Wurzelschädigungen liefern.

Kronenschäden an der Buche wurden in der BRD unter vielen verschiedenen Standortbedingungen beobachtet. Weder die Ernährungssituation noch die klimatischen Bedingungen lassen jedoch auf den ersten Blick Beziehungen zur Symptomausprägung oder Schadensstärke erkennen. Die Wurzeluntersuchungen wurden in 4 Wuchsgebieten an Beständen auf sauren Braunerden (unter pH 4) und auf Parabraunerden (pH 4-6) durchgeführt. Damit sollte geprüft werden, ob mögliche Wurzelschäden in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften variieren. Von Interesse war vor allem, ob Schadsymptome an Wurzeln vorkommen, die sich über Standortdifferenzen hinweg eindeutig als allgemeine Schadmerkmale des Waldsterbens einordnen lassen.

Aus dieser Zielsetzung ergaben sich Besonderheiten für die Art und den Umfang der Probenahme und für die Auswertung. Um eine möglichst umfassende Aussage zu erhalten, wurden insgesamt 12 Aufnahmen in 7 Vergleichskollektiven durchgeführt. Um ein verlässliches Bild von der Feinwurzelschädigung zu erhalten, mußte überdies eine vollständige Erfassung der Wurzelmasse sowie aller Kenngrößen des Kurzwurzelbesatzes erfolgen. Damit war ein erheblicher Aufwand verbunden. Um diesen zu minimieren, fanden Vorversuche statt, in denen u.a. Probenmindestgrößen ermittelt wurden, bei denen die gemessenen Unterschiede

zwischen gesunden und kranken Bäumen als relevant betrachtet werden können. Eine nachträgliche statistische Bearbeitung geschah überdies für jede einzelne Kenngröße an der Gesamtheit der 12 Aufnahmen (vgl. Abschnitt 3.2.3.3).

Weil die Wurzeluntersuchungen als Paarvergleich an Bäumen desselben Bestandes stattfanden, ist der Einfluß von räumlich stark variierenden ökologischen Faktoren (geologisch und klimatisch, Immissionswerte) als weitgehend einheitlich zu betrachten.

Parallel zur Schadklasse der Krone erfolgte auf allen Probeflächen ein Abbau der Feinwurzelmasse: Im Trend zeigte sich zwar eine gleich hohe Wurzelmasse bei gesunden und kranken Bäumen, der Anteil abgestorbener Feinwurzeln war jedoch stets höher bei den geschädigten Buchen. Der für kranke Bäume typische hohe Anteil abgestorbener Wurzeln war im Humusboden fast so hoch wie im Mineralhorizont. Zwar wurde bei geschädigten Bäumen vielfach eine höhere Biomasse im A-Horizont beobachtet. Aber auch diese war von starken Absterbeerscheinungen begleitet. Offensichtlich fungierte dieser Horizont als "Rückzugsgebiet" für Feinwurzeln, was aber letztlich ohne Einfluß auf die Absterbevorgänge blieb. Der Anteil abgestorbener Feinwurzeln in den Horizonten des Oberbodens zeigt damit eine verlässliche Korrelation mit dem Belaubungsgrad der Bäume.

Auf sauren Böden (Neureichenau) war in 50 cm Tiefe kein Unterschied in der Absterberate der Feinwurzeln zwischen unterschiedlich belaubten Buchen festzustellen. Dieses Ergebnis stimmt gut mit den Beobachtungen von MURACH (1984) an Fichte überein. PERSSON (1983) berichtet ebenfalls von einem verstärkten Absterben der Kiefernfeinwurzeln in Mineralhorizonten, das allerdings von einer erhöhten Wurzelbildung begleitet war. MURACH (1984) schloß

aus seinen Ergebnissen, daß der Rückgang des Tiefwurzelsystems nicht primär auf reduzierte Neubildung, sondern auf ein überproportional hohes Absterben zurückzuführen ist.

Für die Buche wird auf lockeren Substraten ein tiefes, dicht verzweigtes Wurzelwerk beschrieben (BÜSGEN, 1905; HILF, 1927; WERLICH und LYR, 1957). Die Kenngrößen des Tiefwurzelsystems waren in unserer Untersuchung auf das Niveau der geschädigten Bäume im Humus abgesunken. Dies läßt eine mangelnde Regeneration des Tiefwurzelsystems vermuten, die, unabhängig vom Belaubungsgrad, alle Bäume in geschädigten Beständen betraf. Ein Übergreifen dieser Absterbevorgänge auf Horizonte des Oberbodens betraf nur geschädigte Bäume.

Zusammenhänge zwischen der Feinwurzelbiomasse und dem Belaubungsgrad bei Buche stellten auch ASCHE und FLÜCKIGER (1987) fest. Zum gleichen Ergebnis kamen für die Fichte LISS et al. (1984) sowie PERSSON und BÖRJESSON (1986). BREDOW et al. (1986) stellten bei geschädigten Altbuchen einen höheren Anteil nekrotischer Feinwurzeln (Längenverhältnis) fest. Gleichzeitig aber besaßen diese Bäume zum Zeitpunkt der Probenahme eine höhere Biomasse. EICHHORN (1987) stellte keinen Unterschied in der Wurzelbiomasse zwischen äußerlich gesunden und geschädigten Altfichten fest.

Die hier auftretenden Widersprüche ließen sich zum Teil damit erklären, daß auch äußerlich gesund erscheinende Bäume bereits starke Verfallserscheinungen im Oberwurzelsystem zeigen. Auch bei den hier dargestellten Unterschieden war dies vermutlich der Fall für "gesunde" Bäume in NR 3a (sehr hohe Anteile toter Wurzeln).

Generell stellt sich die Frage, inwiefern gleich hohe Gesamtwurzelmassen als gleichwertige Gesamtwurzelproduktion bzw. erhöhte Anteile abgestorbener Wurzeln als verstärkte Mortalität anzusehen sind. Im Unterschied zu absoluten Biomasse-Angaben, die als Zustandserfassung zu verstehen sind, stellen Produktion und Mortalität gerichtete Vorgänge dar. Ihre vollständige Beschreibung erfordert daher eine dynamische, d.h. zeitlich gestaffelte Erfassung. Im Vergleich der Standorte spielt Insbesondere die Zersetzungsrate der abgestorbenen Wurzeln eine wichtige Rolle (PERSSON, 1980).

Für die Buche nennt GÖTTSCHE (1972) eine jährliche Wurzelproduktion von mindestens 1500 kg/ha, was ca. 50 % der Blattmassenproduktion ausmacht. FOGEL (1983) ermittelte in montanen Koniferenwäldern einen Feinwurzelumsatz von bis zu 80 % im Jahr. Die hier festgestellten Unterschiede zwischen den Wurzelbio- und -nekromassen von gesunden und geschädigten Bäumen waren jedoch auf allen Probeflächen recht konstant. Auch zwischen den Ergebnissen unterschiedlicher Probetermine ergaben sich keine grundlegenden Differenzen, so daß die beschriebenen Kenngrößen anscheinend gute Indikatoren für die genannten Prozesse darstellen. Es wird daher vermutet, daß gesunde und geschädigte Bäume eine im Trend gleiche Feinwurzelproduktion besitzen, geschädigte Bäume jedoch eine erhöhte Absterberate aufweisen.

Zu diesem Schluß tragen auch die Ergebnisse des Regenerationsversuchs (ingrowth cores) bei, in dem im Verhältnis zur Feinwurzelgangsmasse ähnlich hohe Neuwurzelbildungen sowohl bei gesunden wie bei geschädigten Buchen stattfanden. Zu gleichen Ergebnissen kamen für Buche auch FLÜCKIGER et al. (1986).

Im Gegensatz zum Rückgang des Feinwurzelsystems bei geschädigten Bäumen zeigten die Kennwerte des Mykorrhiza-besatzes keine eindeutigen Beziehungen zum Belaubungsgrad.

Der Mykorrhizierungsgrad schwankte nur in geringem Rahmen. Das Zustandekommen der Symbiose hängt im Wesentlichen vom Vorkommen geeigneter Pilzpartner im Substrat sowie vom Nährstoffangebot seitens der Wirtspflanze ab. An erster Stelle sind hier Nitrat (SLANKIS, 1973) und Kohlenhydrate (HACSKAYLO, 1973) zu nennen. In letzter Zeit wurde wiederholt von einem Rückgang der Pilzflora berichtet (SCHLECHTE, 1984; SCHMITT, 1984). TYLER (1985), hingegen, stellte eine positive Korrelation zwischen Bodensäure und Vorkommen von Mykorrhizapilzen fest. EGLI (1981) wiederum kommt zu dem Schluß, daß die Mykorrhizapilze stets in Böden gedeihen können, die das Wurzelwachstum noch erlauben.

Ein Rückgang der Assimilatversorgung der Wurzeln oberirdisch geschädigter Bäume ist bislang nicht bekannt. WIEBE (1987) ermittelte in den Wurzeln der hier untersuchten Probeebäume in Wolfratshausen gleiche Stärke-Spiegelwerte. FLÜCKIGER et al. (1986) kamen zu einem ähnlichen Ergebnis. EICHORN (1987) stellte sogar erhöhte Stärkegehalte in Wurzeln geschädigter Fichten fest. Ein eindeutiger Beweis des Rückgangs des Mykorrhizierungsgrades geschädigter Buchen wurde meines Wissens auch noch nicht erbracht. Es ist daher zu vermuten, daß das erforderliche Pilz- und Nährstoffangebot auch in geschädigten Beständen und Bäumen über relativ lange Zeit besteht.

Auch zwischen Kenngrößen des Kurzwurzelbesatzes und dem Gesundheitszustand der Krone waren Zusammenhänge nicht ohne weiteres zu erkennen. Im Unterschied zum Mykorrhizierungsgrad schwankte jedoch der Anteil lebender Mykorrhizen wie auch die Mykorrhizen- und Kurzwurzelzahlen

sehr stark in Abhängigkeit von Bestand, Bodenhorizont und Zeitpunkt der Probenahme.

Nur die absolute Mykorrhizenzahl (Anzahl Mykorrhizen / 100 ml Boden) lag meist höher bei den gesunden Bäumen. Darin kam jedoch hauptsächlich die bei diesen Bäumen erhöhte Biomasse zum Ausdruck.

Im Mittel aller Termine und Horizonte waren jedoch die anderen Kenngrößen beinahe gleich. Auf die bedingte Aussagekraft dieser Mittelwerte wurde bereits hingewiesen (vgl. Abschnitt 4.1). Es ist dennoch zu vermuten, daß die festgestellten Schwankungen dieser Kenngrößen zu einem größeren Teil von standortlichen und jahreszeitlichen Einflüssen als vom Schädigungsgrad der Probebäume ausgelöst worden waren. HEUMANN (1986) nimmt ebenfalls an, daß eine Korrelation zwischen der Schadklasse und der Mykorrhiza weitgehend durch äußere Einflüsse überlagert wird. CLOWES (1951) stellte starke Schwankungen des Mykorrhizabesatzes der Buche auch im gleichen Standort fest. MEYER (1967) beschreibt für die Buche eine hohe Empfindlichkeit der Mykorrhizierung gegenüber edaphischen Faktoren, und OBERWINKLER et al. (1986) stellten bei geschädigten Fichten eine erhöhte relative Kurzwurzelzahl bei überwiegend inaktiver Mykorrhiza fest.

Bei unseren Ergebnissen fiel allerdings auf, daß die Variabilität der Vergleichswerte zwischen Beständen, Horizonten und Terminen bei geschädigten Bäumen besonders groß war. So waren stark erhöhte Werte im Humus bei geschädigten Bäumen keine Seltenheit. Dies könnte ein Indiz dafür sein, daß der Kurzwurzelbesatz der geschädigten Bäume, sowohl hinsichtlich der Gesamt-Kurzwurzelproduktion (Kurzwurzelzahl) wie auch hinsichtlich des Anteils lebender Mykorrhizen mit dem entsprechenden Status der gesunden Bäume vergleichbar ist, daß er aber größeren Schwankungen unterworfen ist, sich sozusagen in einem labilen Zustand befindet. MEYER (1987) fand in

gesunden und geschädigten Fichten-altbeständen im Jahresmittel gleiche Mykorrhizen-Zahlen; in den geschädigten Beständen war jedoch ein Einbruch der Werte in den Sommermonaten zu verzeichnen.

Stark erniedrigte Mykorrhizenzahlen bei den geschädigten Bäumen im Humusboden wurden in Schierling und Wolfratshausen gemessen. Diese Bäume gehörten einer höheren Schadklasse als die geschädigten Bäume in NR und T an; sie hatten offensichtlich den labilen Gleichgewichtszustand überschritten, bei dem noch ein "Ausgleich" in den Humushorizonten möglich ist. Zumindest in der ersten Phase der Erkrankung scheinen die Schäden an der Mykorrhiza in einem Verlust an Vitalität, d.h. auch an Effektivität zu bestehen. Diese physiologische Schwächung wurde bereits mehrfach hervorgehoben (KOTTKE und OBERWINKLER, 1986; AGERER et al., 1986; KOTTKE et al., 1986). OELBE-FARIVAR und HÜTTERMANN (1984) stellten in Kulturversuchen Veränderungen der Nitrat-Aufnahme sowie der Fähigkeit zum Ligninabbau für einige Mykorrhiza-Pilzarten durch Aluminium-Säure-Einwirkung fest. Auf Veränderungen in der Leistungsfähigkeit der Mykorrhiza wurde geschlossen. BLASCHKE (1981, 1986) beschreibt an Tanne und Fichte die Umwandlung von Ektomykorrhizen in weniger effizienter Formen, die mit dem Befall durch pathogene Bodenpilze und mit vorzeitiger Seneszenz verbunden war.

Die Ergebnisse der hier vorgestellten Regenerationsversuche deuten ebenfalls eine frühzeitige Alterung der Wurzeln geschädigter Bäume an. Verbunden mit einer gleich hohen Produktion und - zumindest für die Langwurzeln - einer erhöhten Mortalität, kommt dies für die geschädigten Bäume einem fortschreitenden Verfall des Wurzelsystems gleich, der vermutlich parallel zur Entlaubung verläuft.

VOGT (1982) untersuchte die Feinwurzelproduktion von Douglasien auf armen und gut versorgten Böden. Sie kam zu

dem Schluß, daß die Feinwurzelproduktion mit zunehmendem Alter (nach Kronenschluß) auf armen Standorten stieg und umgekehrt auf gut versorgten sank. Es ist nicht auszuschließen, daß diese Mehrproduktion, verbunden mit einer erhöhten Mortalität und einer auf gestörten Standorten erschwerten Ernährung einerseits, und/oder mit einer reduzierten Assimilationsleistung andererseits den Verfall des Wurzelsystems gerade bei älteren Bäumen beschleunigt. Diese vorzeitige Alterungserscheinung könnte ein Grund für die erhöhte Anfälligkeit dieser Bäume darstellen.

Zusammenfassend ist für diese Untersuchungen zu bemerken, daß die Mortalität des Feinwurzelsystems in den Oberbodenhorizonten die zentrale Größe zur Einschätzung von Schädigungen bei Altbuchen war. Von allen untersuchten Wurzelparametern war die Mortalität des Feinwurzelsystems am engsten mit dem Grad der Kronenschädigung der Altbuchen korreliert. Im Hinblick auf die Frage, ob die Relevanz von Nekromassenbestimmungen abzusichern sei, scheint im übrigen eine Abstimmung der Verfahren und Ansprachekriterien vonnöten, um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu bewirken (vgl. PERSSON, 1980; BLASIUS et al., 1985; EICHHORN, 1987).

Der in den Substratversuchen getestete Einfluß des Bodens auf das Wurzelwachstum bestätigte einerseits die für Altbäume beschriebenen Verhältnisse: die relative Mykorrhizenzahl war gleich hoch in den Substraten unter gesunden wie unter geschädigten Bäumen, während das Wurzelwachstum in Substrat "geschädigt" eine Hemmung erfuhr. Daß diese Hemmung nur durch die Wirkung des Humusbodens zu erklären war, widerspricht jedoch den Beobachtungen an Jungpflanzen aus Naturverjüngungen (HÜTTERMANN et al., 1983, sowie eigene Aufnahmen). Schädigungen der Feinwurzeln sind vor allem im Mineralboden anzutreffen. Verbin-

dungen zu den Ergebnissen der Wurzelauftnahmen bei Altbäumen lassen sich nicht unmittelbar herstellen. Bei diesen war nämlich ein Rückgang des Wurzelsystems bei geschädigten Bäumen verstärkt im Mineralboden zu beobachten (Anteil abgestorbener Feinwurzeln für NR 3a im Mittel aller Aufnahmen: im Humus (+) 37 %, (-) 48 %; im Mineralboden (+) 56 %, (-) 58 %).

Die Aussagekraft dieser Versuche wird durch die schlechten Wuchsbedingungen in den einzeln getesteten Substraten (H und M) sowie im Humusboden eingeschränkt. Eine Erklärung für diese Ergebnisse bietet sich allenfalls in der Auswaschung von hemmenden Inhaltsstoffen aus dem Humusboden an. Daß eine Reduzierung des Wachstums bevorzugt im Substrat aus dem Wurzelraum geschädigter Bäume stattfand, verweist auf Auswaschungen aus der Krone. Hierfür könnten entweder freigesetzte mineralische Ionen infrage kommen oder wachstumshemmende Stoffwechselprodukte, die vermehrt in den Assimilationsorganen erkrankter Bäume gebildet werden (HOQUE, 1984, 1985; PAUL und SCHÜTT, 1987).

Aus den relativen Mykorrhizenzahlen läßt sich ablesen, daß Böden aus dem Stammabflußbereich eine ausgeprägte Hemmung gegenüber dem Freiland-Substrat ausüben. GLATZEL und KAZDA (1985) stellten in ähnlichen Versuchen einen gleichgerichteten Wachstumsrückgang von Jungbuchen fest (der hier allerdings nicht eintrat). KUMPFER und HEYSER (1986) berichten von veränderten Mykorrhizaspektren in unmittelbarer Stammnähe. MASON et al. (1986) stellten ebenfalls grundlegende Verschiedenheiten der Mykorrhiza an jungen Birken fest, die in "mycorrhizal" bzw. "non-mycorrhizal" (=Freiland-) Boden wuchsen. Aus diesem Ergebnis, wie auch aus dem Vergleich mit den hohen Werten im Grafrather Boden, läßt sich ein vergleichsweise schwaches Infektionspotential der Böden in Neureichenau ablesen.

Die in den Wurzelanalysen festgestellte Übereinstimmung zwischen den Schadstufen der Probestämme und dem Ca/Al-Verhältnis ihrer Feinwurzeln signalisiert eine physiologische Schwächung der Feinwurzeln erkrankter Bäume (vgl. ULRICH, 1986; MATZNER et al., 1985). BREDOW et al. (1986) ermittelten ebenfalls erhöhte Aluminium-Gehalte in den Feinwurzeln geschädigter Altbuchen. REITER et al. (1983) konnten dagegen keine Korrelation zwischen dem Aluminium-Gehalt von Tannenfeinwurzeln und der Schadklasse der Krone feststellen.

Daß im Vergleich zwischen den Beständen auch eine positive Korrelation zwischen dem Ca/Al-Verhältnis in den Feinwurzeln und im Boden beobachtet werden konnte, zeugt von einer Beteiligung der Bodeneigenschaften an den Schädigungen der Feinwurzeln in den entsprechenden Beständen (Neureichenau). In Wolfratshausen scheidet eine Al-Belastung als ausschlaggebende Ursache aus. Hier weist das Substrat unter den geschädigten Bäumen ein niedrigeres Ca/Al-Verhältnis auf als jenes unter den gesunden Bäumen. Die relative Aluminium-Anreicherung in den Feinwurzeln der geschädigten Bäume könnte hier eine Folge einer vorhergehenden physiologischen Schwächung der Feinwurzeln darstellen. In vergleichenden Versuchen an 37 Buchenaltbeständen konnten FLÜCKIGER et al. (1986) ebenfalls keine Korrelation zwischen den Basen- und Aluminiumgehalten der Böden und den Schadklassen der Bestände feststellen.

Eine Beteiligung der strengen Fröste des Winters 1979/1980 am Aufkommen der Erkrankung im Bayerischen Wald (Neureichenau) wies SUMMERER (1986) nach. Die außergewöhnlichen Ausfälle in den darauffolgenden Jahren gingen ab dem Jahr 1982 deutlich zurück. 1986 wurde in den stark gelichteten Beständen eine mittlere Schadklasse von ca. 1,5 ermittelt (eigene Aufnahme), ein Wert also, der

mit den übrigen untersuchten Probeflächen gut übereinstimmt. Für diese Bestände dürfte im übrigen eine Beteiligung der von BOSCH et al., (1985) für Fichtenbestände des gleichen Wuchsbezirks beschriebene Kombination von anthropogenen abiotischen Schadfaktoren auch an der Erkrankung der Buche in Betracht kommen. Den Stressoren sind sicherlich die hohen Schwefelwerte, die in den Blättern gesunder und erkrankter Buchen ermittelt wurden (im Mittel über 2,1 mg S/g TS, SUMMERER, 1986), zuzurechnen.

Die Frage, inwiefern pathogene Bodenpilze an den Schäden des Wurzelsystems beteiligt sind, konnte bislang nicht eindeutig beantwortet werden. Zwar wurden mehrfach in Isolierungsversuchen hohe Befallsraten in geschädigten Beständen nachgewiesen (BLASCHKE, 1982; LIVINGSTON und BLASCHKE, 1984; SCHÖNHAR, 1984, 1985, 1987).

Die aus den Feinwurzeln im Bestand Wolfratshausen isolierten Pilze sind zum Teil als pathogen zu betrachten. Da sie jedoch in gleicher Häufigkeit in gesunden und geschädigten Bäumen vorkamen, können die verstärkten Schäden bei geschädigten Bäumen nicht primär auf einen Befall durch diese Pilze zurückgeführt werden.

6. ZUSAMMENFASSUNG

- In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, ob zwischen dem Schädigungsgrad der Krone und der Feinwurzelmasse sowie dem Mykorrhizabesatz Zusammenhänge bestehen. Zu diesem Zweck wurden quantitative Aufnahmen an den Feinwurzelsystemen von äußerlich symptomfreien (= gesunden) und geschädigten Buchen durchgeführt. Substratversuche, chemische Boden- und Wurzelanalysen sowie Isolierungsversuche sollten Hinweise über den Grund von Schädigungen liefern.

- Die Feinwurzelbiomasse von geschädigten Bäumen war im oberflächennahen Boden (0-20 cm) stets niedriger als die von gesunden. Bei geschädigten Bäumen waren oft die Feinwurzeln im A-Horizont konzentriert. Die Feinwurzelgesamtmasse war in vielen Fällen gleich hoch bei gesunden und geschädigten Bäumen. In allen Bodenhorizonten war der Anteil abgestorbener Feinwurzeln höher bei geschädigten Bäumen und zeigte von allen bestimmten Kenngrößen die engste Korrelation zu den Kronenschäden.

- Daraus wird auf eine vom Schädigungsgrad der Krone weitgehend unabhängige Feinwurzelproduktion - zumindest im vom Baum durchwurzelten Bodenbereich - und auf eine erhöhte Absterberate bei geschädigten Bäumen geschlossen.

- In 50 cm Tiefe hatte auf saurer Braunerde ein starker Rückgang des Feinwurzelsystems bei allen Probeebäumen unabhängig von der Schadstufe der Krone stattgefunden.

- Der Anteil lebender Mykorrhizen sowie die Mykorrhizenzahlen von äußerlich gesunden und geschädigten Bäumen änderten sich stark nach Probebeständen, Bodenhorizonten und Probeterminen. Diese Merkmale besaßen anscheinend bei geschädigten Bäumen eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Umweltfaktoren. Dies kommt einer vorzeitigen Seneszenz

der Mykorrhizen gleich. Relativ stabil dagegen war der Mykorrhizierungsgrad.

- Äußerlich geschädigte Jungbuchen aus Naturverjüngungen besaßen ein reduziertes Wurzelsystem. Vor allem die Biomasse ging zurück.

- In Substratversuchen bewirkten die Humushorizonte unter geschädigten Bäumen vermutlich eine Hemmung der Feinwurzelentwicklung von Buchenkeimlingen. Diese Hemmung könnte durch Auswaschungen aus der Krone der Altbuchen bewirkt werden.

- Die Feinwurzeln sowie der Boden aus dem Wurzelraum von geschädigten Altbuchen hatten ein niedrigeres Ca/Al-Verhältnis als dasjenige von gesunden Pflanzen. Dies weist auf eine Säureschädigung des Feinwurzelsystems von Altbuchen auf armen Standorten hin. Andererseits bestand kein Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Waldschäden und der Basensättigung des Standorts.

- Ein ursächlicher Zusammenhang zwischen Feinwurzel-schäden in vom Waldsterben betroffenen Beständen und dem Befall durch pathogene Pilze konnte nicht nachgewiesen werden.

7. LITERATURVERZEICHNIS

- AGERER, R.; BRAND, F.; GRONBACH, E., 1986: Die exakte Kenntnis der Ektomykorrhizen als Voraussetzung für Feinwurzeluntersuchungen im Zusammenhang mit dem Waldsterben. AFZ 20, 497-504
- A.K. Standortskartierung, 1987: Forstliche Standortsaufnahme. Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup.
- ASCHE, N.; FLÜCKIGER, W., 1987: Erste Ergebnisse der Wurzeluntersuchungen in zwei Buchenbeständen in der Nordwest-Schweiz. AFZ 27/28/29, 758-761.
- BARTONEK, G.; WERNER, H., 1983: Ionenchromatographische Bestimmung von Chlor und Schwefel in Pflanzenproben aus einem Aufschluß. GIT Fachzeitschr. f. Laboratorium 12, 1075 -1076
- BJÖRKMANN, E., 1956: Über die Natur der Mykorrhizabildung unter besonderer Berücksichtigung der Waldbäume und die Anwendung in der forstlichen Praxis. Forstw. Cbl. 75 (9/10), 257-512.
- BLAISE, T.; GARBAYE, J., 1983: Effets de la fertilisation minérale sur les ectomycorhizes d'une Hêtraie. Acta Oecologica/Oecol. Plant. 4 (18): 165-169
- BAYERISCHES LANDESAMT f. UMWELTSCHUTZ, 1985: Luft-hygienischer Jahresbericht 1985. Schriftenreihe Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Heft 70. München.
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM f. ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT u. FORSTEN, 1986: Ergebnisse der Waldschadenserhebung 1986. München.
- BLASCHKE, H., 1980: Feinwurzeluntersuchungen und biotische Aktivitäten in der Rhizosphäre vom Tannensterben befallener Abies alba-Bestände. Eur. J. For. Path. 10, 181-185.
- , 1981a: Rhizographische Untersuchungen an Feinwurzel-systemen aus verschiedenen Abies alba- Beständen Bayerns. Eur. J. For. Path. 11, 87-97.

- , 1981b: Schadbild und Ätiologie des Tannensterbens - II. Mykorrhizastatus und Pathogene Vorgänge im Feinwurzelbereich als Symptome des Tannensterbens. Eur. J. For. Path. 11, 375-379.
- , : 1982: Schadbild und Ätiologie des Tannensterbens - III. Das Vorkommen einer Phytophthora - Fäule an Feinwurzeln der Weißtanne (Abies alba Mill.). Eur. J. For. Path. 12 (4-5), 232-238.
- , 1986: Einfluß von saurer Beregnung und Kalkung auf die Biomasse und Mykorrhizierung der Feinwurzeln von Fichten. Forstw. Cbl. 105, 325-329.
- BLASIUS, D.; KOTTKE, I.; OBERWINKLER, F., 1985: Zur Bewertung der Güte von Fichtenwurzeln geschädigter Bestände. Forstw. Cbl. 104, 318-325.
- BÖHM, W.; KÖPKE, U., 1977: Comparative root investigations with two profile wall methods. Z. Acker- und Pflanzenbau 144, 297-303.
- BÖRJESSON, J.; PERSSON, H., 1986: Fine root damage in relation to needle loss in a nature spruce forest. In: Indirect effects of air pollution on forest trees - Root-Rhizophere interaction. Jülich, 1985.
- BOSCH, CH.; PFANNKUCH, E.; BAUM, U.; REHFUESS, K.E., 1985: Über die Erkrankung der Fichte (Picea abies Karst.) in den Hochlagen des Bayerischen Waldes. Forstw. Cbl. 102, 167-181.
- BREDOW, B.v.; BUGGERT, A.; ECKHOFF, A.; HOLLSTEIN, B.; NEUMANN, M.; SCHINDEL, R.; WEBER, A.; ZECH, S.; GLAVAC, V., 1986: Vergleichende Untersuchungen der Boden-, Wurzel- und Blatt-Mineralstoffgehalte von Bäumen verschiedener Schadstufen in einem immissionsbelasteten Altbuchenbestand. AFZ 22, 551-554.
- BÜSGEN, M., 1905: Studien über die Wurzelsysteme einiger dicotyler Holzpflanzen. Flora 95 (Ergänz.-Band), 58-94.
- BUNDESMINISTERIUM für ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT und FORSTEN, 1983: Ergebnisse der Waldschadenserhebung 1983 im Bundesgebiet.
- CERNY, G., 1974: Mykorrhiza der Waldbäume - Entstehung, Bedeutung für den Ernährungszustand und für die Disposition zum Befall durch pathogene Pilze. Forstarchiv 45 (5), 77-82.
- CLOWES, E.A.L., 1951: The structure of mycorrhizal Roots of Fagus sylvatica. New Phytologist 50, 1-16.

- ECKSTEIN, D.; RICHTER, K.; ANIOL, R.W.; QUIEHL, F., 1984: Dendroklimatologische Untersuchungen zum Buchensterben im südwestlichen Vogelsberg. Forstw. Chl. 24, 24-39.
- EGLI, S., 1981: Die Mykorrhiza und ihre vertikale Verteilung in Eichenbeständen. Schweiz. Zeitschr. ForstW. 132 (5), 345-53.
- EICHHORN, J., 1987: Vergleichende Untersuchungen von Feinwurzelsystemen bei unterschiedlich geschädigten Altfichten (Picea Abies Karst.). Diss. Univ. Göttingen.
- FLÜCKIGER, W., BRAUN, S.; FLÜCKIGER-KELLER, H., 1984: Untersuchungen über Waldschäden in der Nordwestschweiz. Schweiz. Zeitschr. ForstW. 135 (5), 389-444.
- ; BRAUN, S.; FLÜCKIGER-KELLER, H.; LEONARDI, S.; ASCHE, N.; BÜHLER, U.; LIER, M., 1986: Untersuchungen über Waldschäden in festen Beobachtungsflächen der Kantone Basel-Landschaft, Basel-Stadt, Aargau, Solothurn, Bern, Zürich und Zug. Schweiz. Zeitschr. ForstW. 137 (II), 917-1010.
- FOGEL, R., 1983: Root turnover and productivity of coniferous forests. Plant and Soil 71, 75-85.
- ; HUNT, G., 1979: Fungal and arboreal biomass in a western Oregon Douglas-fir ecosystem: distribution patterns and turnover. Can. J. For. Res. 9, 245-256.
- FORSCHUNGSBEIRAT WALDSCHÄDEN/LUFTVERUNREINIGUNGEN, 1984: Zwischenbericht 1984. Karlsruhe.
- GEHRMANN, J., 1983: Zur Entwicklung von Buchenjungenpflanzen auf unterschiedlich immissionsbelasteten Standorten. Der Forst- und Holzwirt 38 (6), 150-154.
- , 1984: Einfluß von Bodenversauerung und Kalkung auf die Entwicklung von Buchenverjüngungen (F. sylvatica L.) im Wald. Ber. Forschungszentr. Waldökosysteme/ Waldsterben d. Univ. Göttingen., Bd.1.
- GÖTTSCHE, D., 1972: Verteilung von Feinwurzeln und Mykorrhizen im Bodenprofil eines Buchen- und Fichtenbestandes im Solling. Mitt. d. Bundesforsch.-Anst. f. Forst-Holzwirtsch., Reinbek. Hamburg.
- GLATZEL, G.; KAZDA, M., 1985: Wachstum und Mineralstoffernährung von Buche (Fagus sylvatica) und Spitzahorn (Acer platanoides) auf versauertem und schwermetallbelastetem Bodenmaterial aus dem Einsickerungs-

- bereich von Stammabflußwasser in Buchenwäldern. Z. Pflanzenernaehr. Bodenk. 148, 429-438.
- GLAVAC, V., 1987: Calcium-, Magnesium-, Kalium- und Zink-Gehalte in Blättern eines immissionsgeschädigten Rendzina-Buchenwaldes. AFZ 12, 303-305.
- HACSKAYLO, E., 1973: Carbohydrate physiology of ectomycorrhizae. In: Marks, G.C.; Koslowski, T.T. (Eds.): Ectomycorrhizae - Their Ecology and Physiology. New York and London.
- HARLEY, J.L.; SMITH, S.E., 1983: Mycorrhizal symbiosis. Academic Press, London, New York. 483 S.
- HEUMANN, H.-G., 1986: Morphologische und physiologische Schädigungen des Mykorrhiza-Wurzelsystems bei der Buche als Folge von Bodenbelastungen und Möglichkeiten der Regeneration. KBA-Seminar, Zwischenbericht, Nov. 1986.
- HILDEBAND, E.E., 1986: Zustand und Entwicklung der Austauschereigenschaften von Mineralböden aus Standorten mit erkrankten Waldbeständen. Forstw. Cbl. 105 (1), 60-76.
- HILF, H.H., 1927: Wurzelstudien an Waldbäumen. Hannover: M. und H. Schaper-Verlag. 121 S.
- HOQUE, E., 1984: Spruce die-back: isolation of p-hydroxy-acetophenone from diseased shoots of Picea abies. Phytochemistry 23 (4), 923-925.
- , 1985: Norway-spruce die-back: occurrence, isolation and biological activity of p-hydroxy acetophenone-O-glucoside and their possible role during stress phenomena. Eur. J. For. Path. 15, 129-145.
- HÜTTERMANN, A., 1985: Symptome des Waldsterbens. AFZ 4, 67-70.
- ; BECKER, A.; GEHRMANN, J.; TISCHNER, R., 1983: Einfluß von Schadstoffen und Kalkdüngung auf die Morphologie der Wurzeln von Fagus sylvatica. In: Wurzelökologie und ihre Nutzenanwendung. Int. Symp. Gumpenstein, 1982, Bundesanst. Gumpenstein, A-8952 Irnding, 637-652.
- JOCHHEIM, H., 1985: Der Einfluß des Stammablaufwassers auf den chemischen Bodenzustand und die Vegetationsdecke in Altbuchenbeständen verschiedener Waldbestände. Ber. Forschungszentr. Waldökosysteme/Waldsterben d. Univ. Göttingen, Bd. 13.

- KAZDA, M.; GLATZEL, G., 1984: Schwermetallanreicherung und Schwermetallverfügbarkeit im Einsickerungsbereich von Stammablaufwasser in Buchenwäldern (F. sylvatica) des Wienerwaldes. Z. Pflanzenernaehr. Bodenk. 147, 743-752.
- KNOCH, K., 1952: Klimaatlas von Bayern. Bad Kissingen.
- KOENIES, H., 1985: Über die Eigenart der Mikrostandorte im Fußbereich der Altbuchen unter besonderer Berücksichtigung der Schwermetallgehalte in der organischen Auflage und im Oberboden. Ber. Forschungszentr. Waldökosysteme/ Waldsterben 2.
- KOTTKE, I.; OBERWINKLER, F., 1986: Mykorrhiza of Forest trees - Structure and function. Trees (1986), 1-24.
- ; RAPP, CH.; OBERWINKLER, F., 1986: Zur Anatomie gesunder und kranker Feinstwurzeln von Fichten: Meristem und Differenzierungen in Wurzelspitzen und Mykorrhizen. Eur. J. For. Path. 16, (13), 159-171.
- KÖSTLER, J.N.; BRÜCKNER, E.; BIBELRIETHER, H., 1968: Die Wurzeln der Waldbäume. Hamburg, Berlin: Verlag Paul Parey. 284 S.
- KREUTZER, K.; ZELLES, S., 1986: Die Auswirkungen von saurer Beregnung und Kalkung auf die mikrobielle Aktivität im Boden. Forstw.Cbl. 105, 314-317
- KUMPFER, W.; HEYSER, W., 1986: Effects of stemflow on the mycorrhiza of beech (Fagus sylvatica L.). In: Mycorrhizae: Physiology and genetics. 1st ESM, Dijon, 1-5 July 1985, S.745-750 - INRA. Paris.
- LISS, B.; BLASCHKE, H.; SCHÜTT, P., 1984: Vergleichende Feinwurzeluntersuchungen an gesunden und erkrankten Altfichten auf zwei Standorten in Bayern - ein Beitrag zur Waldsterbenforschung. Eur. J. For. Path. 14, 90-102.
- LIVINGSTON, W.H.; BLASCHKE, H., 1984: Deterioration of mycorrhizal short roots and occurence of mycelium radialis atrovirens on declining Norway spruce in Bavaria. Eur. J. Path. 14 (6), 340-348.
- MAHONEY, M.J.; CHEVONE, B.I.; SKELLY, J.M.; MOORE, L.D., 1985: Influence of mycorrhizae on the growth of Loblolly pine seedlings exposed to ozone and sulfure dioxide. Phytopathology 75, 679-682.

- MARKS, G.C.; DITCHBURNE, N.; FOSTER, R.C., 1967: A technique for making quantitative estimates of mycorrhiza populations in Pinus radiata Forests and its application in Victoria. Austr. For. 32, 26-38.
- MASON, P.A.; LAST, R.T.; WILSON, I., 1986: effects of different soils on the establishment and influence of sheathing mycorrhizas. In: Mycorrhizae: physiology and genetics - 1st ESM, Dijon, 1985, S.767-772 - INRA, Paris.
- MATZNER, E.; ULRICH, B.; MURACH, D.; ROST-SIEBERT, K., 1984: Zur Beteiligung des Bodens am Waldsterben. Ber. Forschungszentr. Waldökosysteme/ Waldsterben d. Univ. Göttingen, Bd.2, S.1-21.
- MEYER F.H., 1967: Feinwurzelverteilung bei Waldbäumen in Abhängigkeit vom Substrat. Forstarch. 38, 286-290.
- , 1987: Das Wurzelsystem geschädigter Waldbestände. AFZ 27/28/29, 754-757.
- MURACH, D., 1984: Die Reaktion der Feinwurzeln von Fichten (Picea abies Karst.) auf zunehmende Bodenversauerung. Göttinger Bodenkundliche Berichte 77, 1-126.
- NEITE, H.; WITTIG, R., 1985: Korrelation chemischer Bodenfaktoren mit der floristischen Zusammensetzung der Krautschicht im Stammflußbereich von Buchen. Acta Oecol., Oecol. Plant. 6 (20), 375-385.
- OBERWINKLER, F.; KOTTKE, I.; RITTER, TH.; FEIL, W., 1986: Vergleichende Untersuchungen der Feinstwurzelsysteme und der Anatomie von Mykorrhizen nach Trockenstreß und Düngemaßnahmen. KfK - PEF 4, Bd.1, 316-329.
- OELBE-FARIVAR, M.; HÜTTERMANN, A., 1984: Untersuchungen zur Beeinflussung der Physiologie ausgewählter Mykorrhiza-Pilze durch Al-Ionen in simulierter Bodenlösung. Ber. d. Forschungszentr. Waldökosysteme/ Waldsterben d. Univ. Göttingen, Bd.3, 159-189.
- PAUL, L.; SCHÜTT, P., 1987: Auswaschung phytotoxischer Substanzen aus Blättern kranker und gesunder Buchen - Schäden an der Bodenflora. Eur. J. For. Path. 17 (6), 356-362.
- PERSSON, H., 1980: Spatial distribution of fine-root growth, mortality and decomposition in a young scots pine stand in central Sweden. Oikos 34, 77-87.
- , 1983: The Distribution and Productivity of fine Roots in boreal forests. Plant and Soil 71, 87-101.

- ; BÖRJESSON, I., 1986: Root development in forest stands subjected to different regimes of acidity and nutrients. In: Indirect effects of air pollution on forest trees - Root-Rhizosphere interaction. Jülich, 1985.
- PRINZ, B.; KRAUSE, G.H.M.; JUNG, K.D., 1982: Waldschäden in der Bundesrepublik Deutschland. LIS Berichte 28. Landesamt für Immissionsschutz, Essen.
- RANFT, H.; BELLMANN, CH.; FEILER, S.; MICHAEL, G.; TESCHE, M., 1979: Untersuchungen zum Zusammenwirken von Immissions- und Frosteinfluß im Fichtenrauchschadgebiet. Beiträge f. Forstwirtschaft 4, 160-165.
- REHFUESS, K.E., 1981: Über die Wirkung der sauren Niederschläge in Waldökosystemen. Forstw. Cbl. 100, 363-381.
- , 1983: Walderkrankungen und Immissionen - eine Zwischenbilanz. AFZ 38, 601-610,
- ; FLURL, H.; FRANZ, F.; RAUNECKER, E., 1983: Growth pattern, phloem nutrients contents and root characteristics of beech (*Fagus sylv. L.*) on soils of different reaction. In: Effects of Accumulation of Air Pollutants in Forest Ecosystems, 359-375.
- REICH, P.B.; SCHOETTLE, A.W.; STROO, H.F.; TROIANO, J.; AMUNDSON, R.G., 1984: Effects of O₃, SO₂, and acidic rain on mycorrhizal infection in northern red oak seedlings. Can. J. Bot. 63, 2049-2055.
- REITER, H.; ALCUBILLA, M; REHFUESS, K.E., 1983: Standortskundliche Studien zum Tannensterben: Ausbildung und Mineralstoffgehalte der Wurzeln von Weißtannen (*Abies alba*, Mill.) in Abhängigkeit von Gesundheitszustand und Boden. AFZ 154 (4/5), 82-92.
- RODENKIRCHEN, H., 1986: Auswirkungen von saurer Beregnung und Kalkung auf die Vitalität, Artenmächtigkeit und Nährstoffversorgung der Bodenvegetation eines Fichtenbestandes. Forstw. Cbl. 105, 339-350.
- ROLOFF, A., 1985: Morphologie der Kronenentwicklung von *F. sylvatica* (L.) unter besonderer Berücksichtigung möglicherweise neuartiger Veränderungen. Diss. Univ. Göttingen, 1985, 178 S.
- ROST-SIEBERT, K., 1983: Aluminium-Toxizität und -toleranz an Keimpflanzen von Fichte (*Picea abies* Karst.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.). AFZ 12, 686-689.

- SCHENK, N.C., (ed.), 1982: Methods and Principles of Mycorrhizal Research. The American Phytopathological Society, St. Paul, USA. 244 S.
- SCHLECHTE, G., 1984: Struktur und Biomassedynamik der Basidiomyceten-Flora in geschädigten Waldökosystemen am Beispiel eines Fichtenforstes im Hils. Ber. Forschungszentr. Waldökosysteme/ Waldsterben d. Univ. Göttingen, Bd.3, 131-134.
- SCHMITT, J.A., 1984: Vortrag zur Vorstellung des "Atlas der Pilze des Saarlandes", Saarbrücken.
- SCHÖNHAR, S., 1984: Infektionsversuche an Fichten- und Kiefernkeimlingen mit aus faulen Feinwurzeln von Nadelbäumen häufig isolierten Pilzen. Allg. Forst- u. Jagd-Ztg. 155 (7-8), 191-192
- , 1985: Untersuchungen über das Vorkommen pilzlicher Parasiten an Feinwurzeln der Tanne (*A. alba* Mill.). Allg. Forst- u. Jagd-Ztg. 156 (12), 247-251.
- , 1987: Untersuchungen über das Vorkommen pilzlicher Parasiten an Feinwurzeln 70- bis 80-jähriger Fichten (*Picea abies* Karst.). Mitt. d. Vereins f. forstl. Standortskde. Forstpflanzenzchtg. 33, 77-80.
- SCHÖPFER, W.; HRADETZKY, I., 1984: Der Indizienbeweis: Luftverschmutzungen maßgebliche Ursache der Wald-erkrankung. Forstw. Cbl. 103, 231-248.
- SCHÜTT, P.; KOCH, W.; BLASCHKE, H.; LANG, K.J.; REIGBER, E.; SCHUCK, H.J.; SUMMERER, H., 1983: So stirbt der Wald: Schadbilder und Krankheitsverlauf. München; Wien; Zürich. 127 S.
- ; COWLING, E.B., 1985: Waldsterben. A general decline of forests in Central Europe: Symptoms, development and possible causes. Plant disease 69 (7), 548-558.
- ; SUMMERER, H., 1983: Waldsterben - Symptome an Buche. Forstw. Cbl. 102 (3), 201-206.
- SEIBERT, P., 1968: Übersichtskarte der natürlichen Vegetationsgebiete von Bayern 1:500 000 mit Erläuterungen. Schriftenr. f. Vegetationskde. 3, Bad Godesberg.
- SLANKIS, V., 1973: Hormonal relationships in mycorrhizal development. In: Marks, G.C.; Koslowski, T.T. (eds.): Ectomycorrhizae - Their Ecology and Physiology. New York and London.

- STAUFFER, H.B., 1982: A sample size table for forest sampling. *Forest. Sci.* 28 (4), 777-784.
- SUMMERER, H., 1986: Untersuchungen zur Symptomentwicklung und zum Krankheitsverlauf der Buchenkronendürre. *Ber. Bay. Forstl. Versuchs- und Forschungsanst., München.*
- THORMANN, A., 1986: Belastungen des Bodens durch Schwermetalle. *Forstw. Cbl.* 105 (1), 39-47.
- TYLER, G., 1985: Macrofungal flora of Swedish beech forest related to soil organic matter and acidity characteristics. *For. Ecol. Manag.* 10 (1-2), 13-31.
- ULRICH, B., 1981: Eine ökosystemare Hypothese über die Ursachen des Tannensterbens. *Forstw. Cbl.* 100, 228-236.
- , 1986a: Die Rolle der Bodenversauerung beim Waldsterben: Langfristige Konsequenzen und forstliche Möglichkeiten. *Forstw. Cbl.* 105, 421-435.
- , 1986b: Natural and anthropogenic components of soil acidification. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.* 149, 702-717.
- VOGT, K.; VOGT, D.; EDMONDS, R.L., 1982: Effect of stand development and site quality on the amount of fine root growth occurring in the forest floor of douglas-fir stands. In: *Wurzelökologie und ihre Nutzanwendung. Int. Symp. Gumpenstein, 1982, Bundesamt Gumpenstein, A-8952 Irdning*, 585-594.
- WELLER, F., 1983: Methode zur Ermittlung der Saugwurzelverteilung von Bäumen. In: *Wurzelökologie und ihre Nutzanwendung. Int. Symp. Gumpenstein, 1982, Bundesamt Gumpenstein, A-8952 Irdning*, 81-94.
- WERLICH, I.; LYR, H., 1957: Über die Mykorrhizausbildung von Kiefer (*Pinus sylvestris* L.) und Buche (*Fagus sylvatica* L.) auf verschiedenen Standorten. *Arch. f. Forstwesen* 6 (1), 1-23.
- WIEBE, S., 1987: Untersuchungen über den Stärkegehalt in Buchenwurzeln. Diplomarbeit d. Forstwiss. Fakultät d. Univ. München.
- WITTIG, R., 1986: Acidification phenomena in beech (*Fagus sylvatica*) forests of Europe. *Water, Air and Soil pollution*, 31, 317-323.

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. Schütt für die Überlassung des Themas und für das Interesse am Fortgang der Arbeit. Für die kritische Durchsicht des Manuskripts bedanke ich mich auch.

Bei Dr. Blaschke, dem Betreuer dieser Arbeit, und bei Dr. Lang bedanke ich mich für die Hilfe, die sie mir in allen Fragen gewährten. Vielen Dank an Dr. Holdenrieder für die wertvolle Hilfe bei der Bestimmung der Pilzarten.

Bei allen Mitarbeitern des Instituts und auch der Forstverwaltung, die mir beim Gelingen dieser Arbeit behilflich waren, bedanke ich mich; insbesondere für die freundliche Unterstützung seitens der Thurn und Taxis'schen Forstverwaltung.

Vielen Dank Herrn Prof. Dr. Rehfuess für die großzügige Übernahme der Bodenanalysen in seinem Institut. Für die gewissenhafte Durchführung derselben bedanke ich mich bei Fr. González.

Dank auch Herrn Prof. Dr. v. Schönborn und Herrn Bartonek für die Durchführung der Elementanalysen.

Bei den Mitarbeitern der GIV-Gesellschaft bedanke ich mich für die geduldige Anleitung am Bildschirm bei der abschließenden Verarbeitung des Textes.

Lebenslauf

Jean-Marc VINCENT

Geboren am 15.09.53 in Sainte Colombe (F-69)

Eltern: Maurice Vincent und Andrée Vincent, geb. Alex

Schulische Ausbildung

1959-1963: Volksschule in Vienne (F-38)

1963-1969: Gymnasium in Vienne (F-38)

1970-1971: Gymnasium in Rouen (F-76)

1972: Gymnasium in Lyon (F-69)

1972: Abitur in Lyon

1973-1974: Berufliche Tätigkeit in Frankreich

Studium

1975-1982: Studium der Forstwissenschaft an der LMU
in München

1982: Diplom

Seit 1983: Promotion am Lehrstuhl für Forstbotanik
in München

